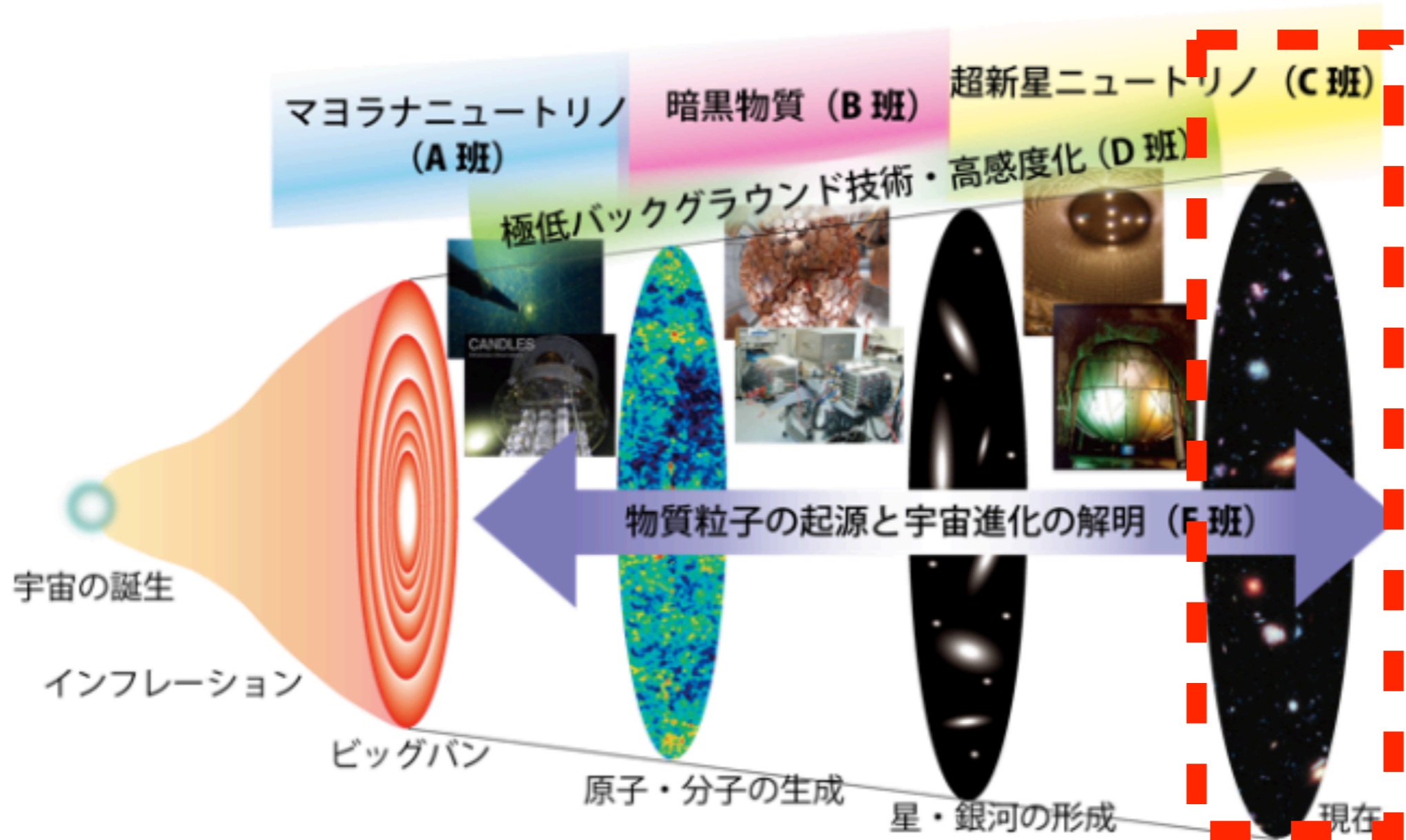


C02班

超新星前兆ニュートリノ

東北大学ニュートリノ科学研究センター

石徹白晃治



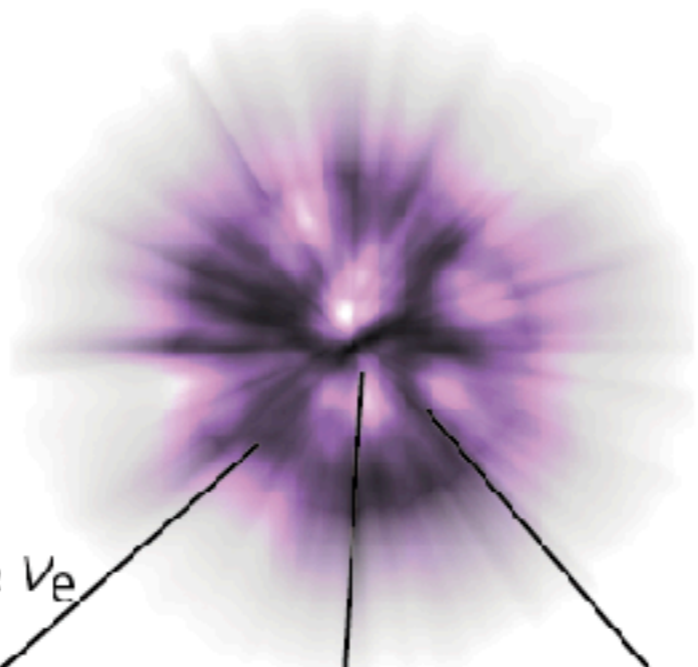
超新星ニュートリノによる天体活動の研究 (超新星へ至る恒星進化と超新星爆発機構)

超新星爆発

赤色超巨星



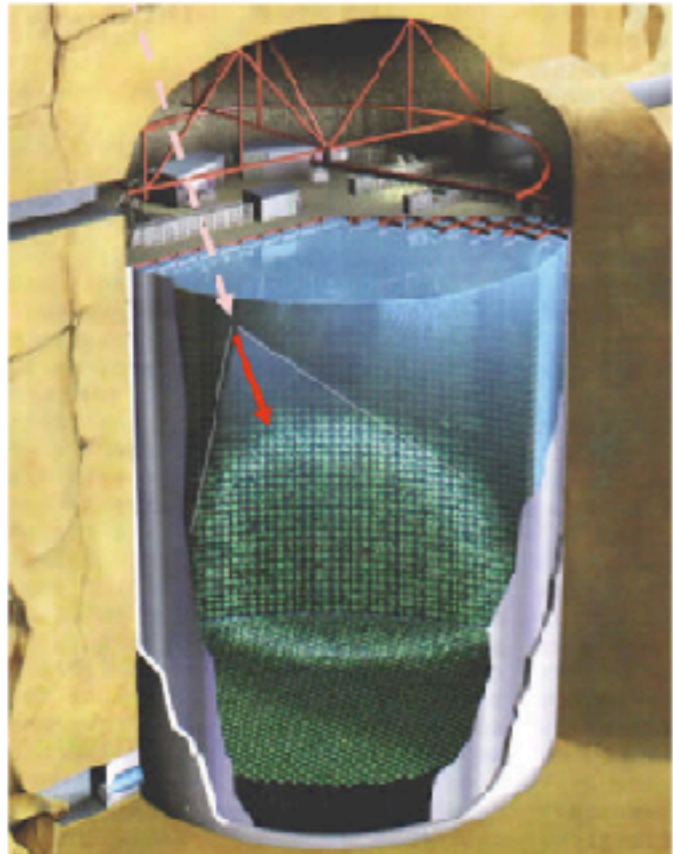
前兆 ν



$\bar{\nu}_e$ & ν_e

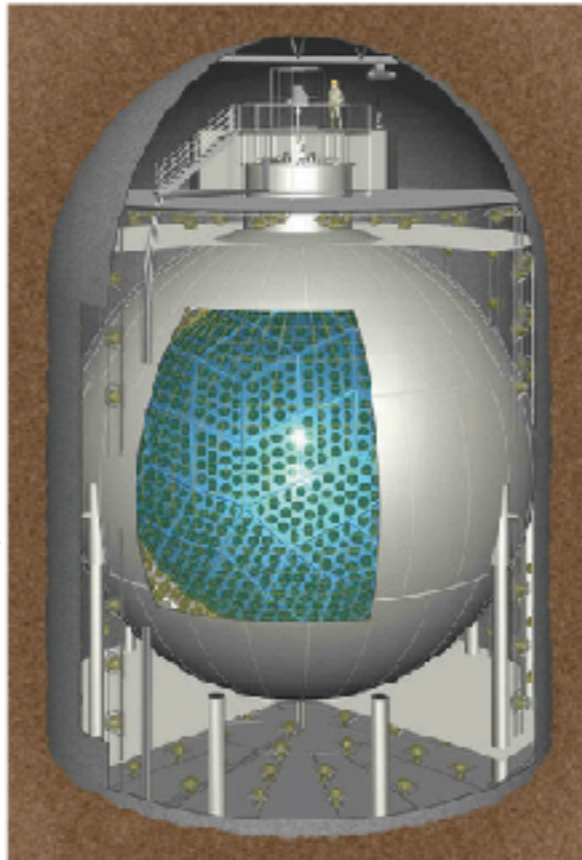
ν_x & $\bar{\nu}_e$

ν_x



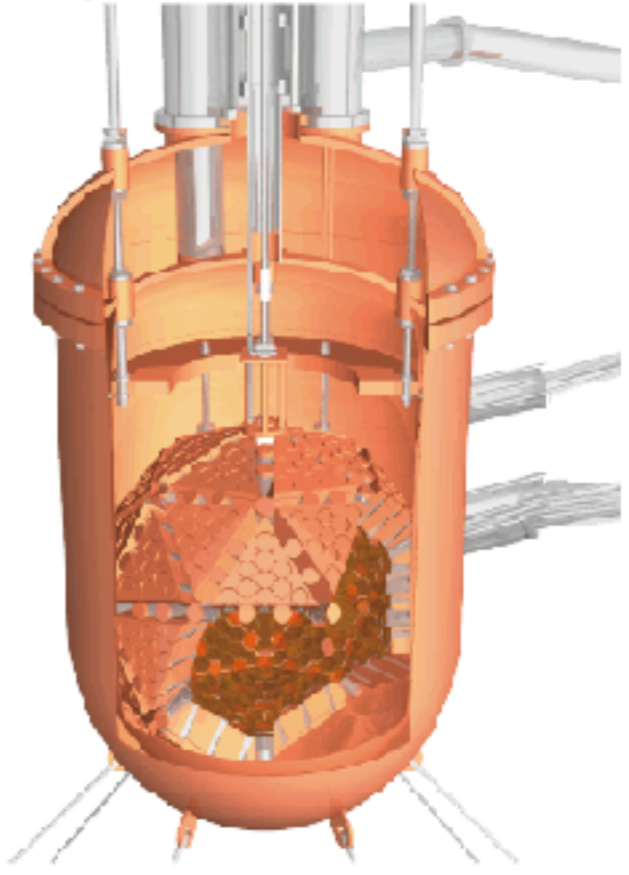
Super-Kamiokande

速報



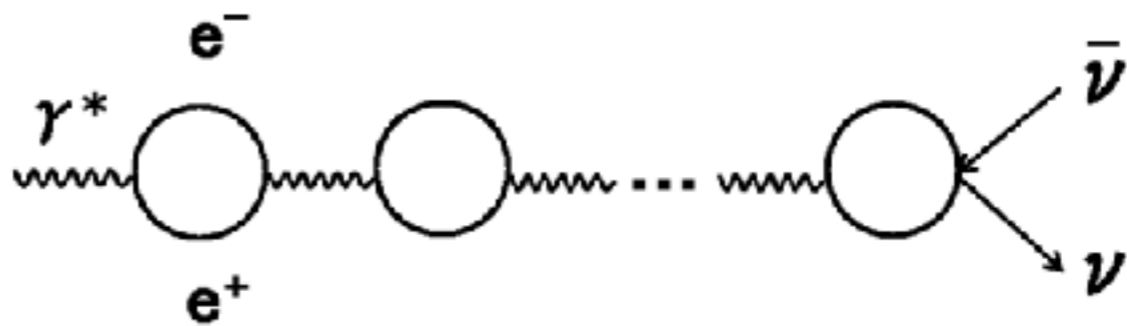
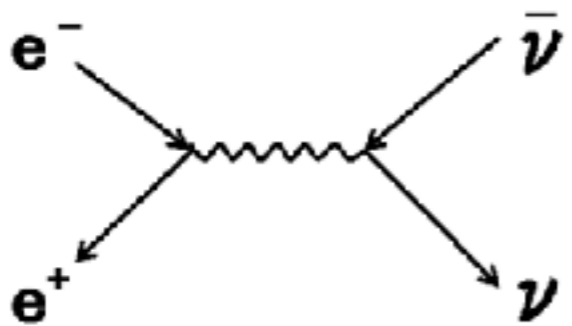
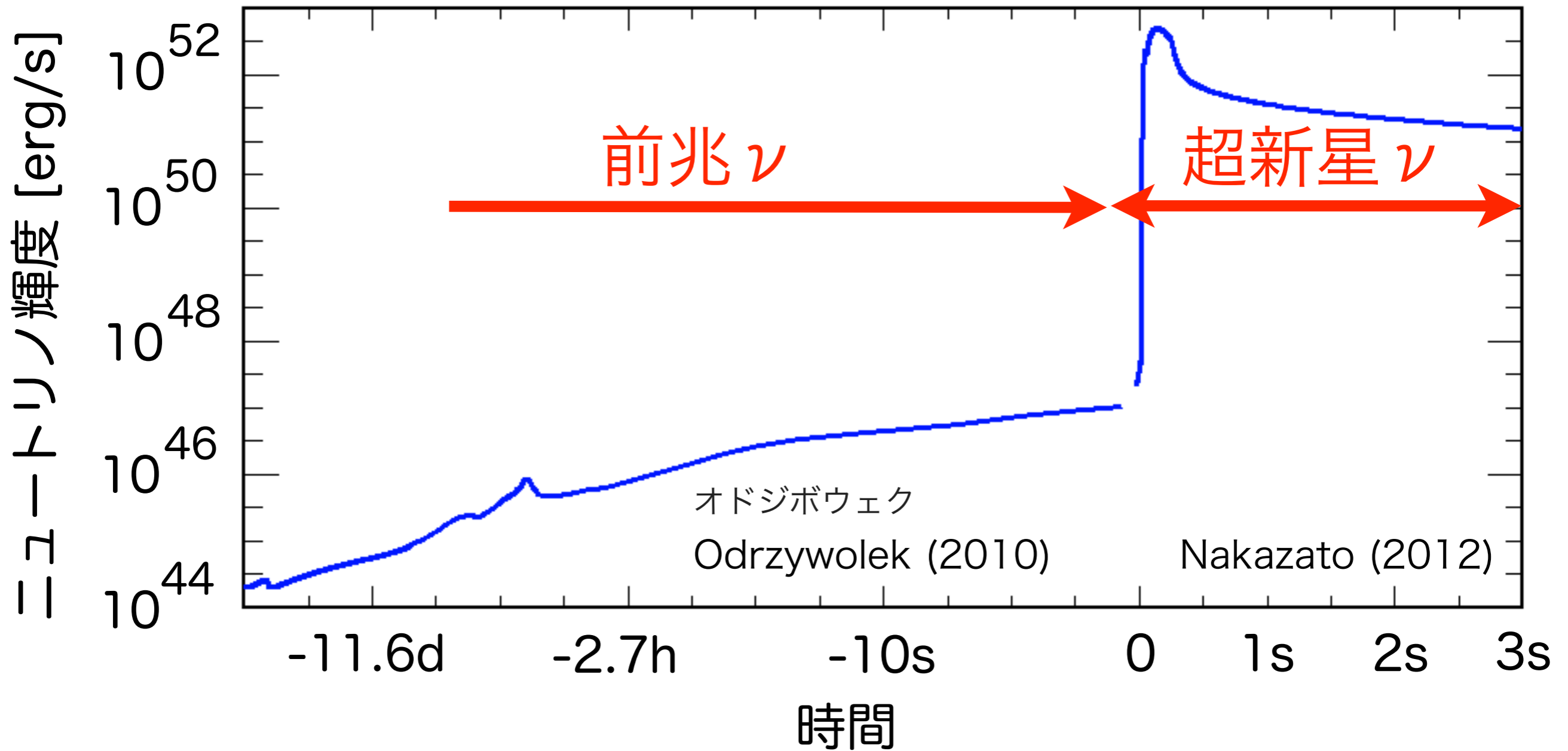
KamLAND

速報

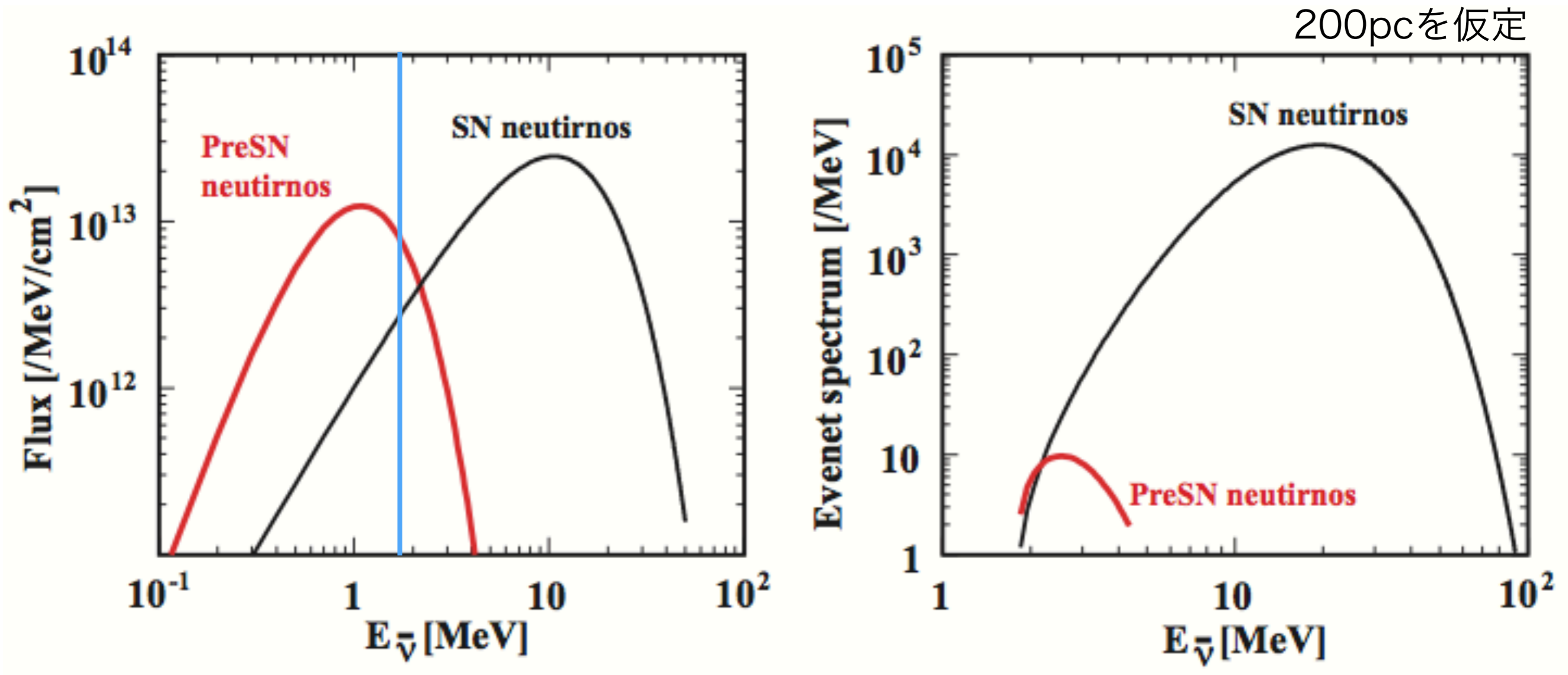


XMASS

超新星前兆ニュートリノの時間変化



超新星前兆ニュートリノのスペクトル



期待される物理

- 燃焼過程の直接観測
- 超新星コア構造の解明
- 爆発前超新星アラーム

超新星前兆ニュートリノの先行研究

Pair neutrinos

Ordzywolek et al. (2004); Misiaszek et al. (2006)

Plasma neutrinos

Ordzywolek et al. (2007)

Neutrinos by weak interactions

Ordzywolek (2009)

検出器でのevent数

Ordzywolek et al. (2007); Ordzywolek & Heger (2010)

我々の研究

詳細な時間変化: イベント数と燃焼フェーズ

Yoshida et al. (2016)

Collapsing段階の ν 放出

Kato et al (2017)

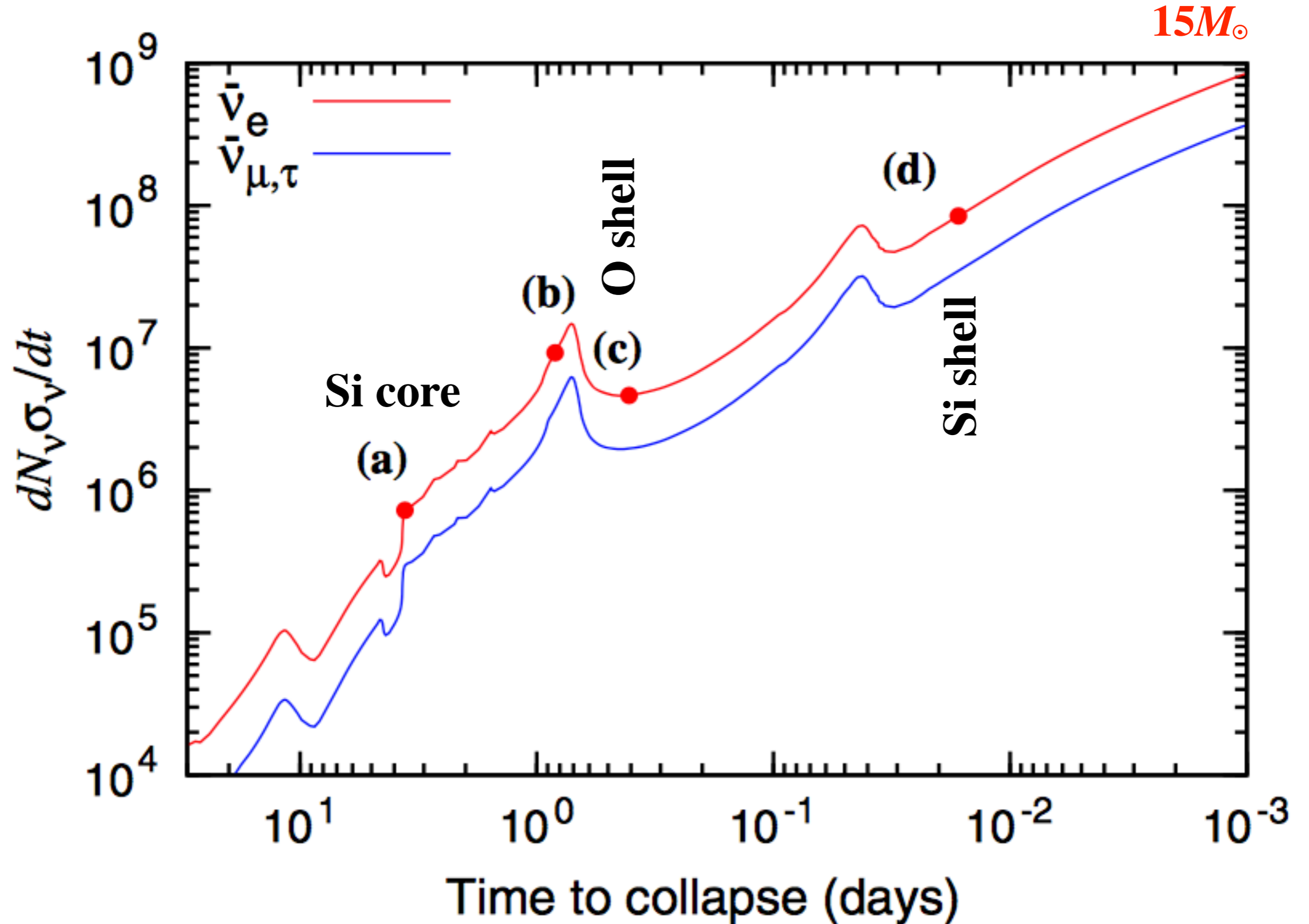
親星依存性

Kato et al (2015) Yoshida et al. 準備中

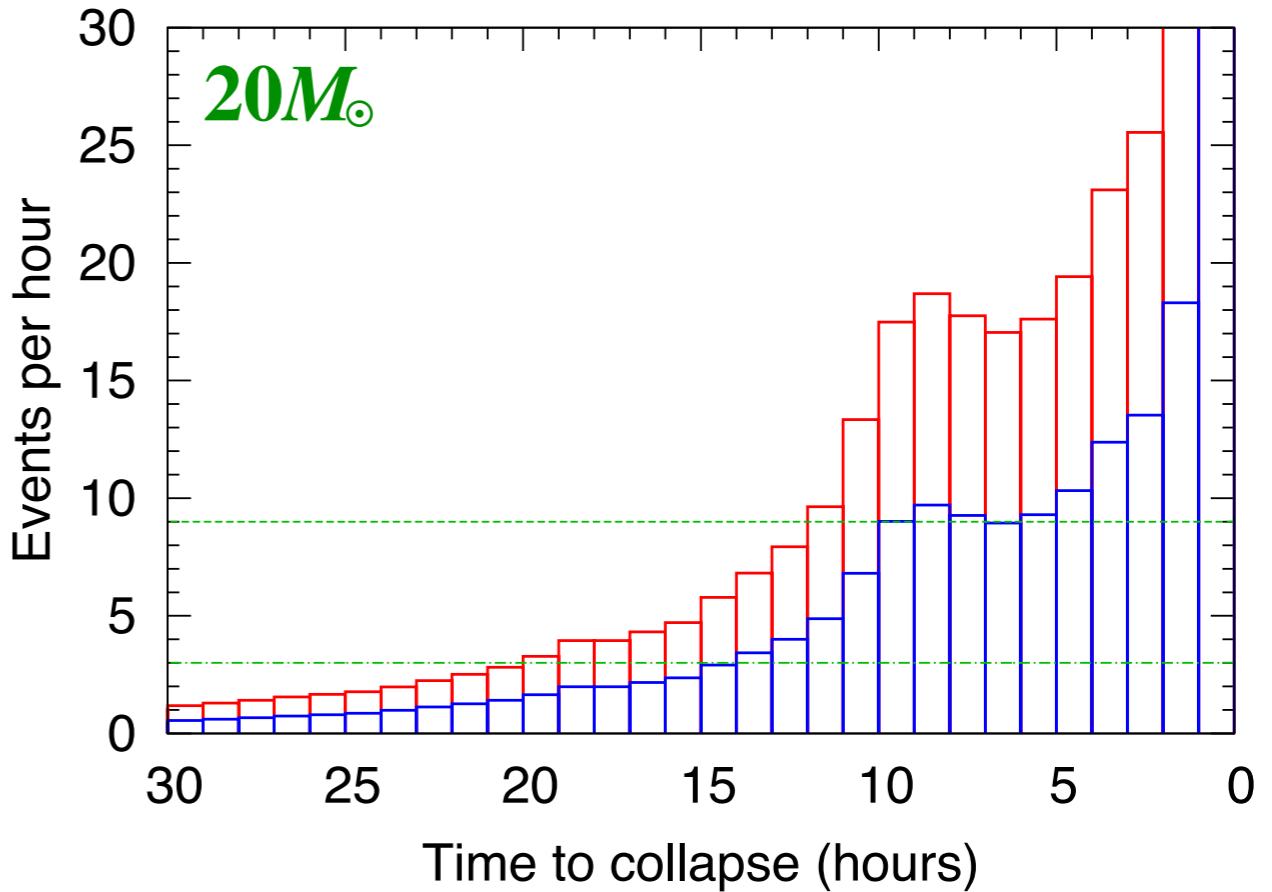
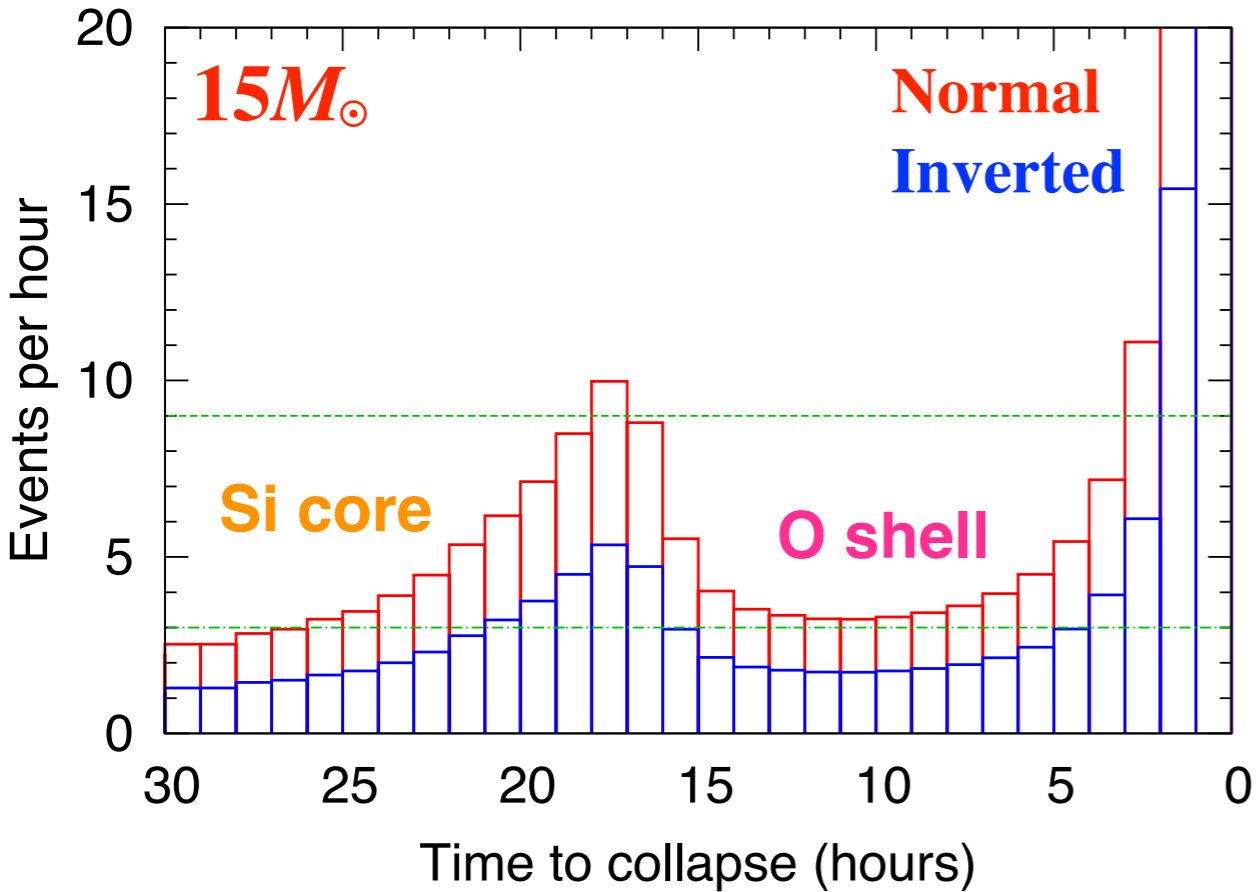
KamLANDでの検出可能性

Asakura et al (2016)

重み付けされたニュートリノ数



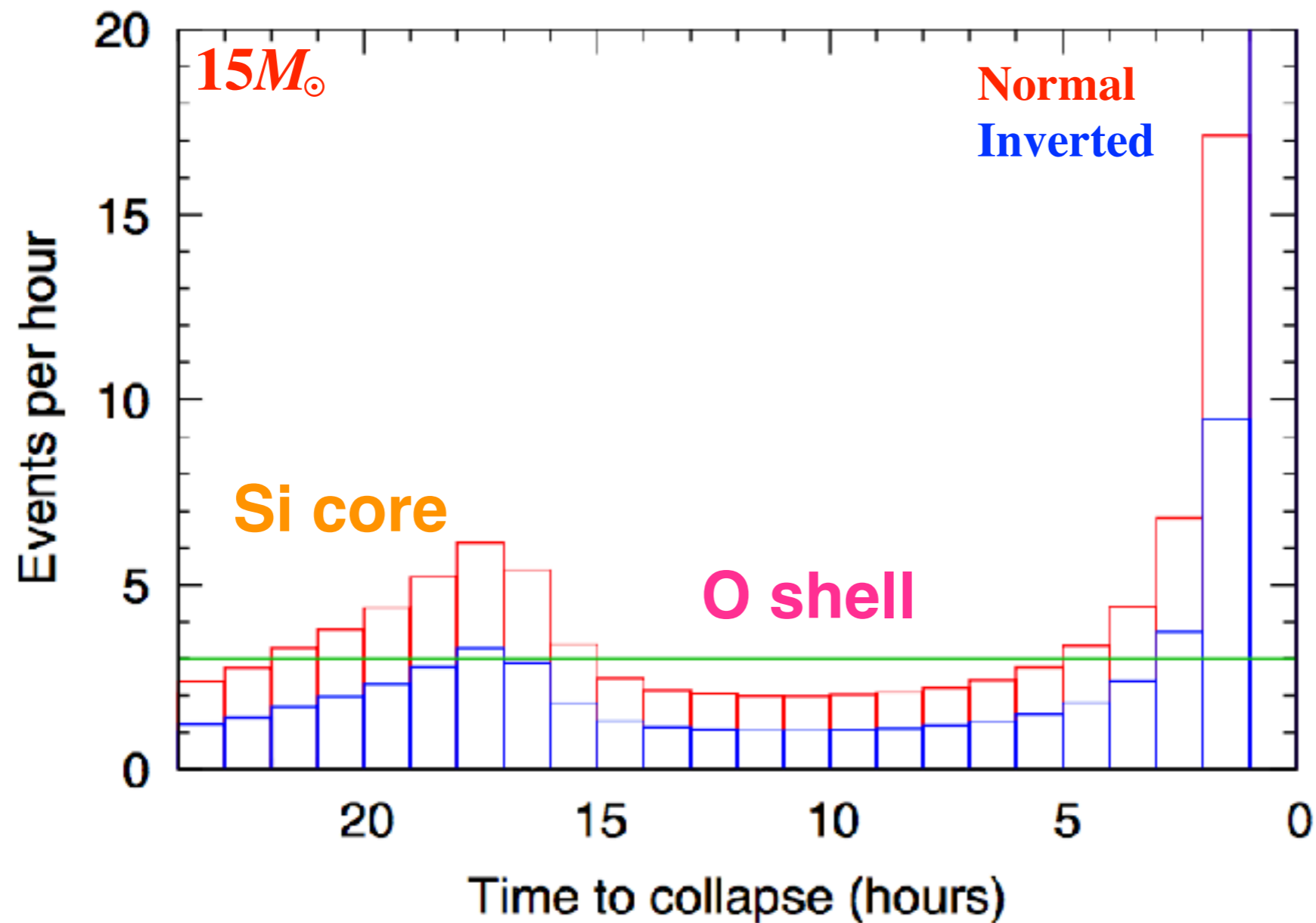
JUNOでの予想イベント数



Si core 燃焼 → **O shell** 燃焼

星の中心での燃焼過程の進化をニュートリノで観測

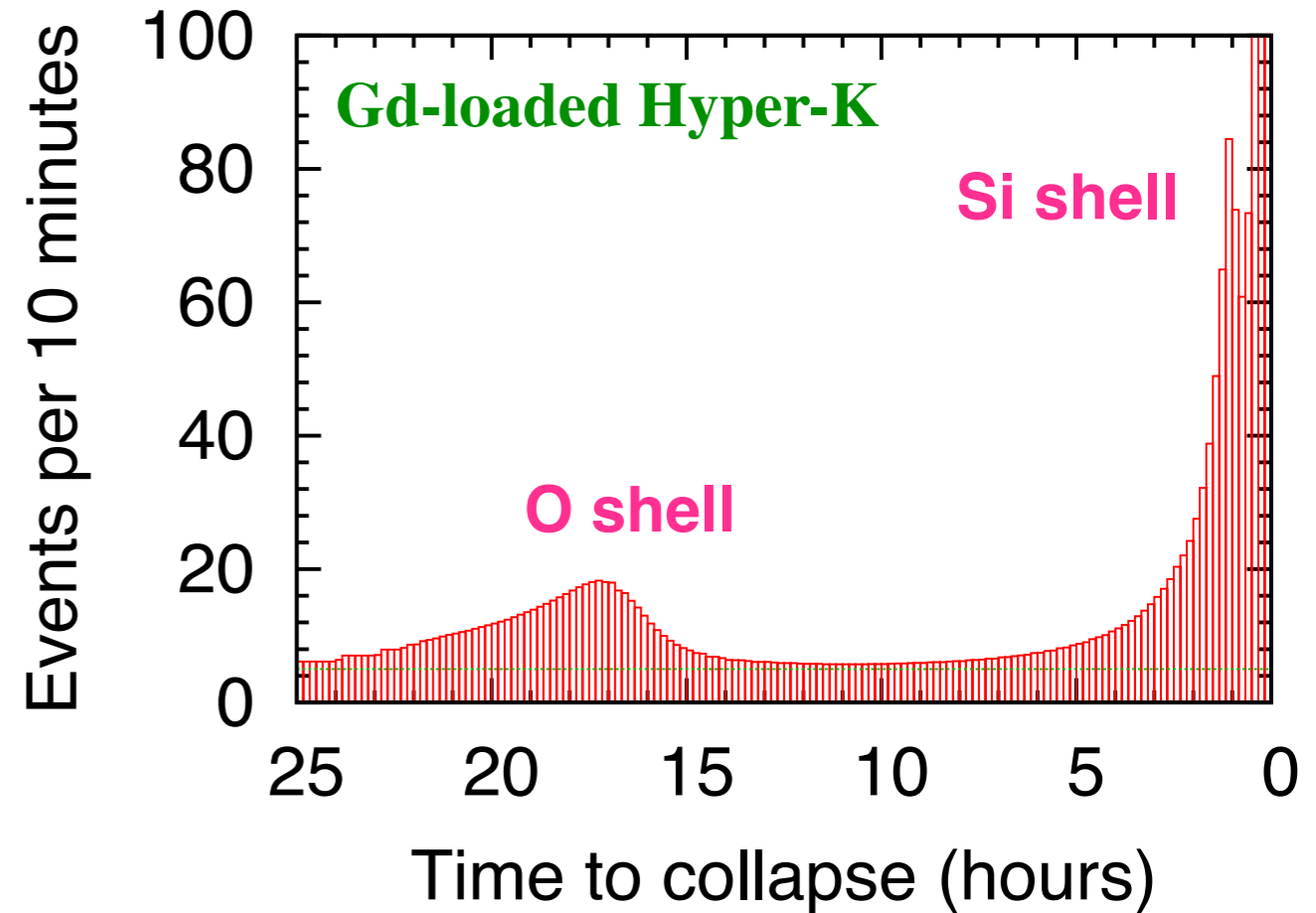
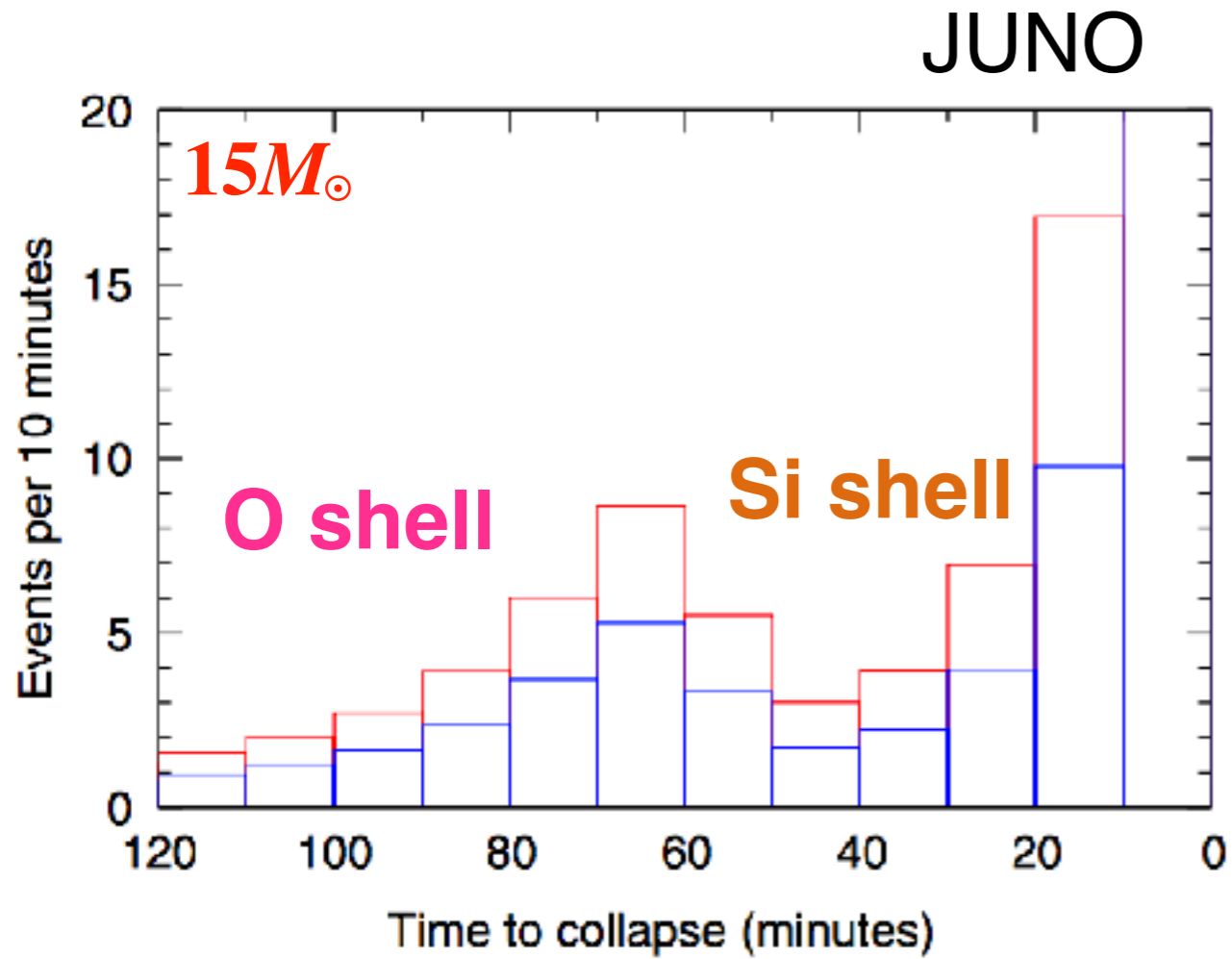
SK-Gdでの予想イベント数



Delayedを50%検出可能と仮定

BGを低減できれば **Si core**燃焼 → **O shell**燃焼 を観測可能

Si shell 燃烧



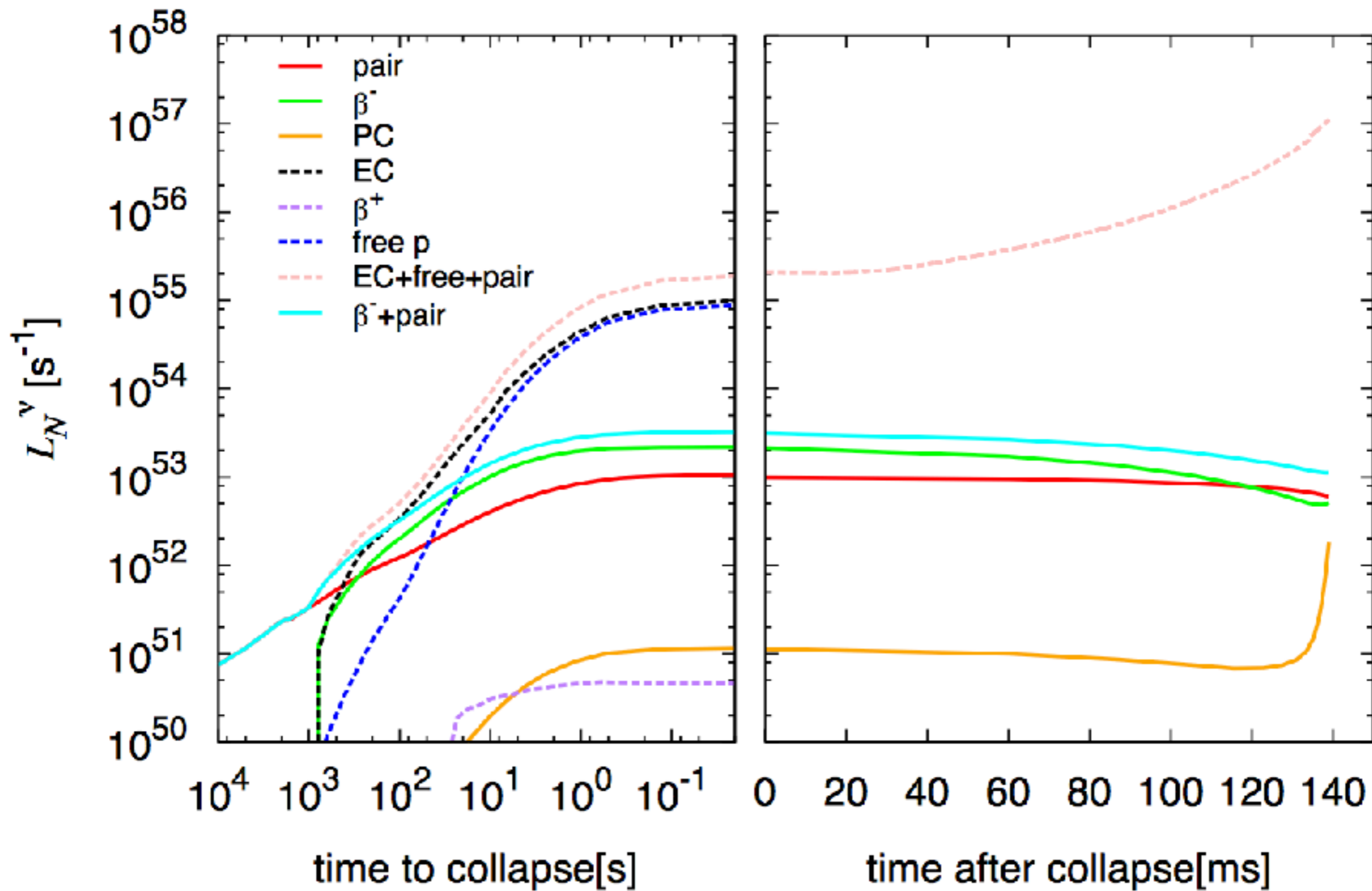
JUNO shell -> Si shellが観れるかも.....

HK-Gd: 詳細な時間変動を測定可能

collapse前後

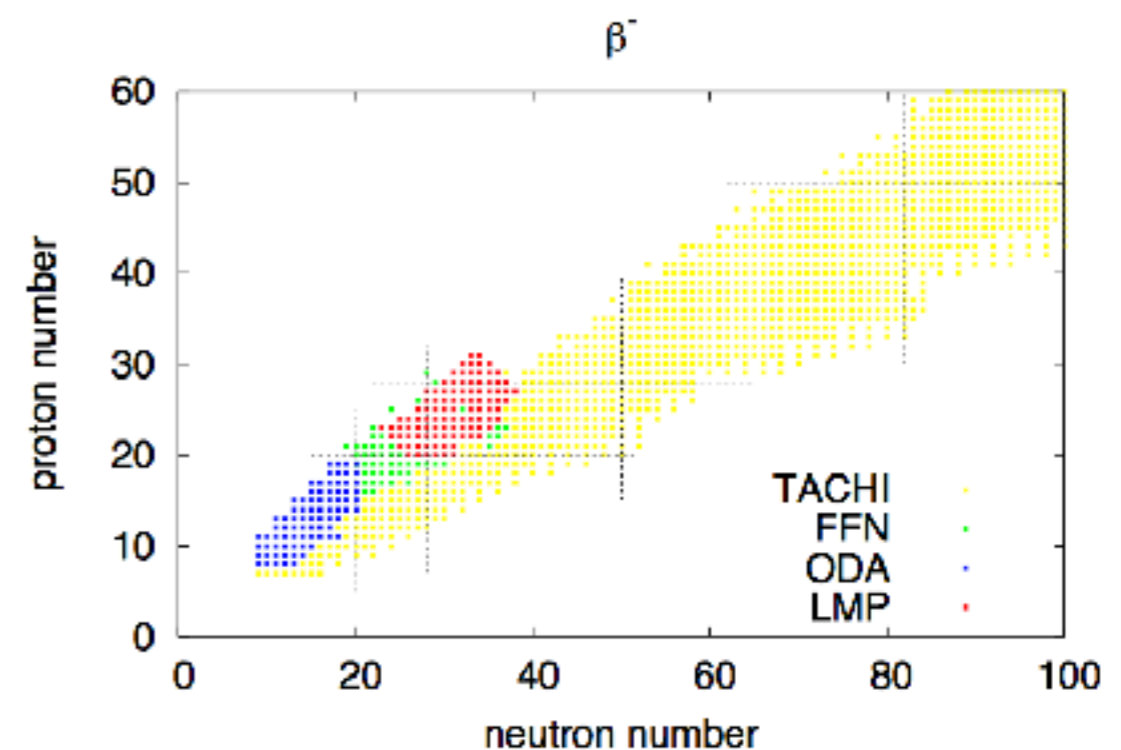
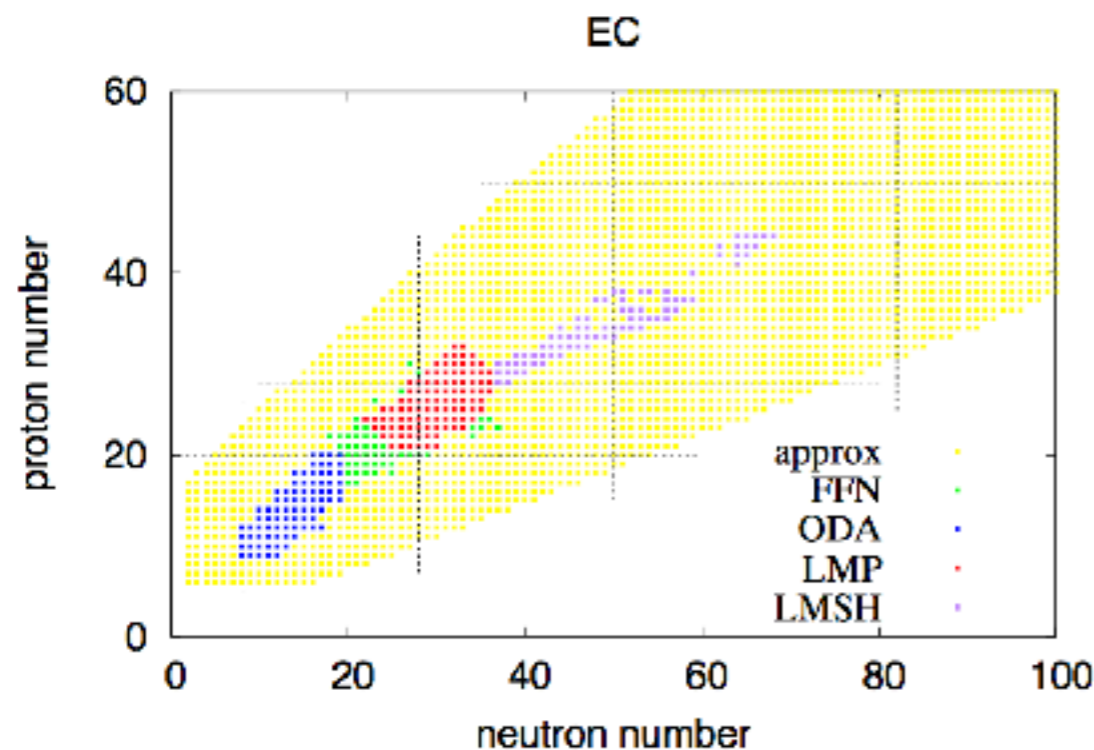
progenitor

collapse

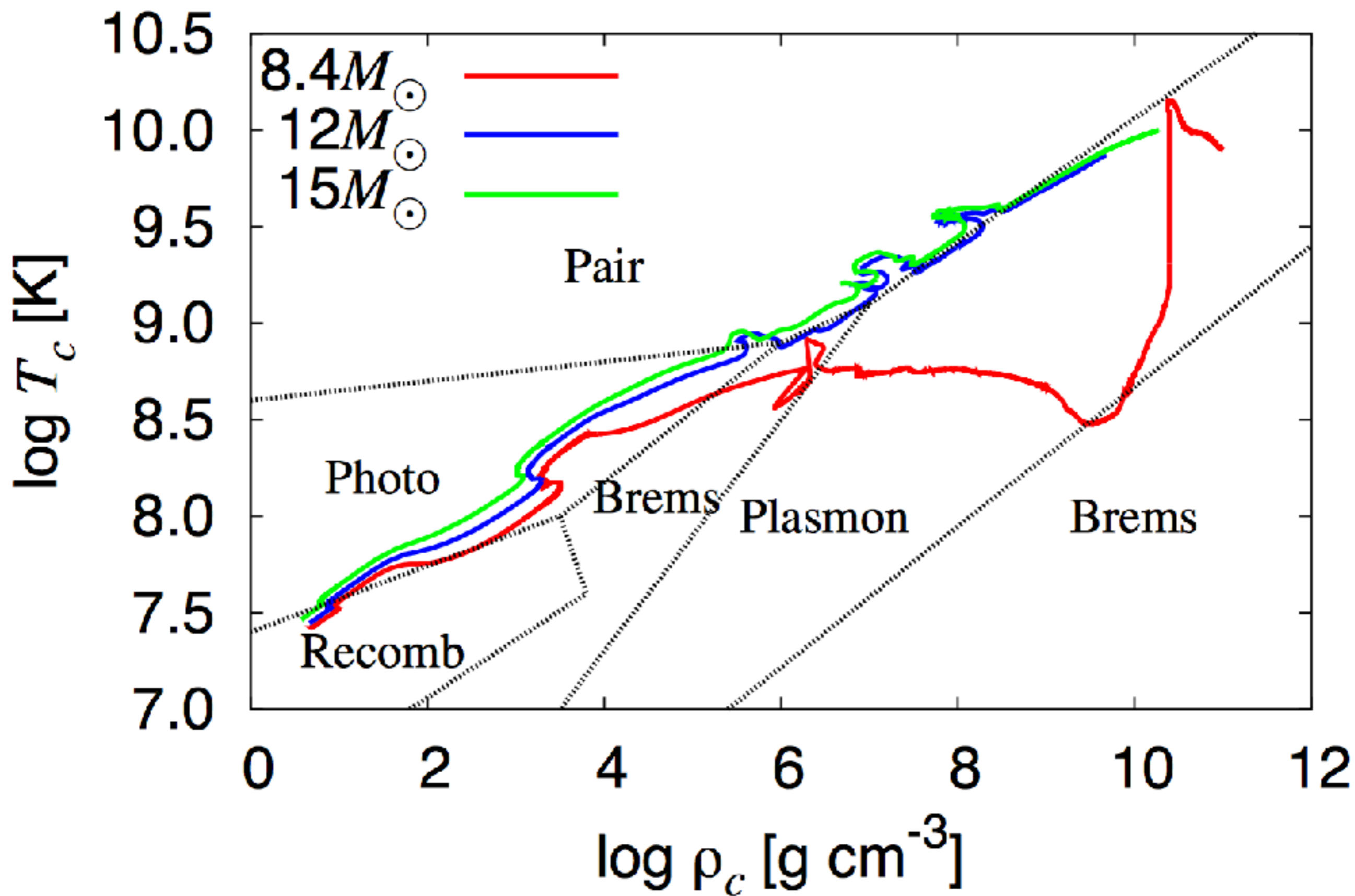


広範な原子核反応を考慮

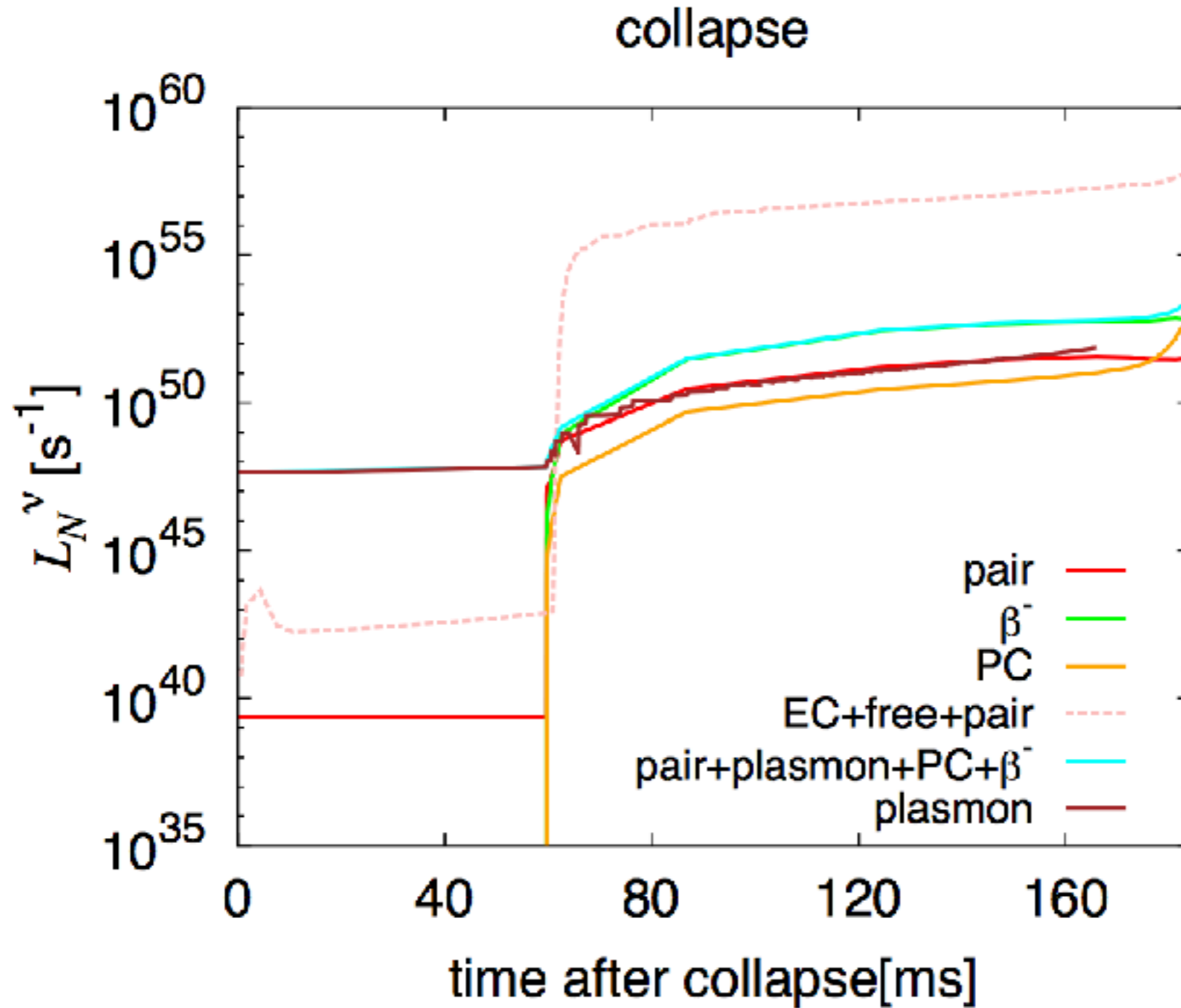
		reactions	collapse phase ^a	colors ^b
thermal processes	pair plasmon	$e^- + e^+ \longrightarrow \nu + \bar{\nu}$ $\gamma^* \longrightarrow \nu + \bar{\nu}$	ν_e :T, others:P -	red brown
nuclear processes	EC	$(Z, A) + e^- \longrightarrow (Z - 1, A) + \nu_e$	T	black
	β^+	$(Z, A) \longrightarrow (Z - 1, A) + e^+ + \nu_e$	-	purple
	PC	$(Z, A) + e^+ \longrightarrow (Z + 1, A) + \bar{\nu}_e$	P	orange
	β^-	$(Z, A) \longrightarrow (Z + 1, A) + e^- + \bar{\nu}_e$	P	green
	free p	$p + e^- \longrightarrow n + \nu_e$	T	blue



電子捕獲型超新星爆発



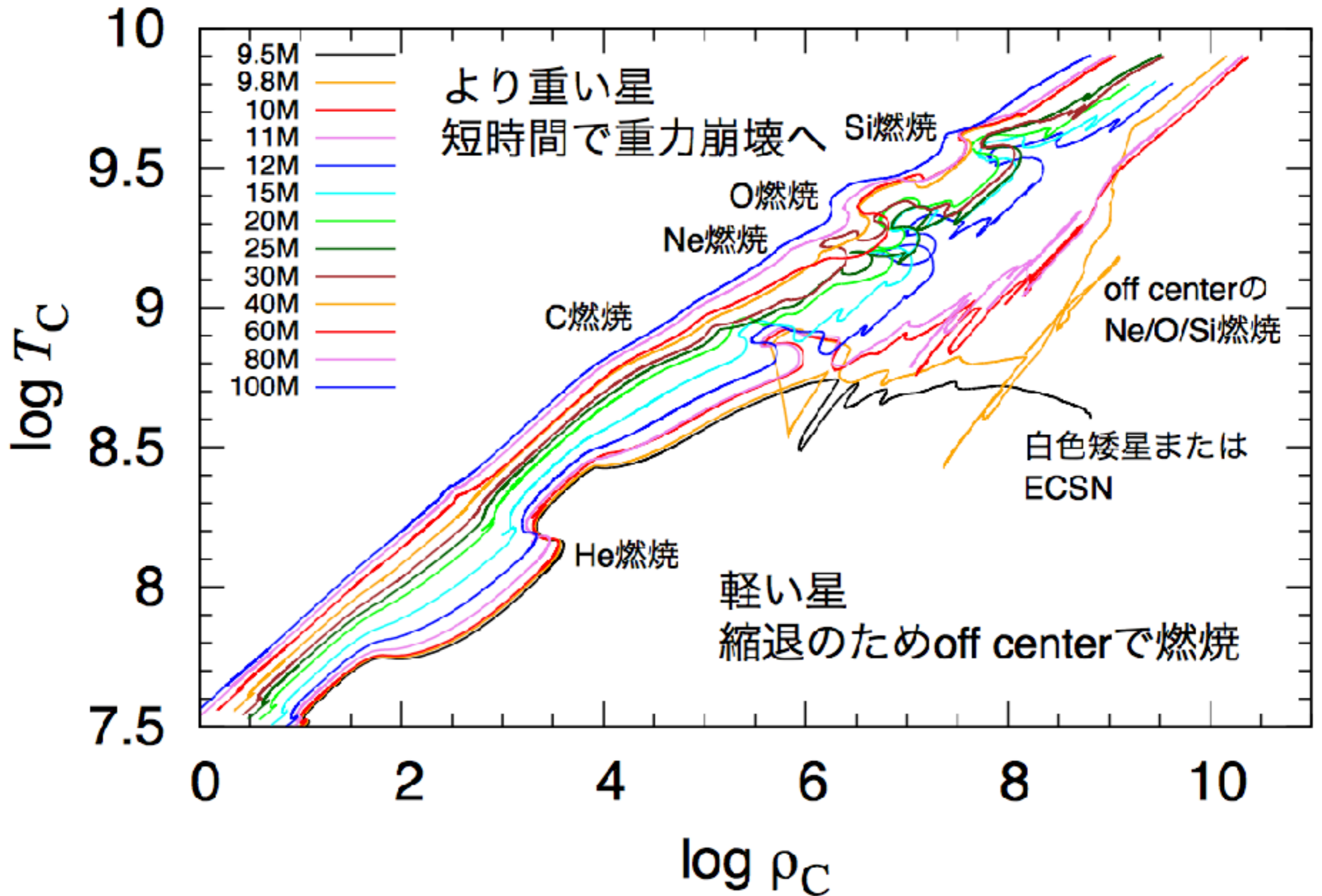
電子捕獲型超新星爆発



前兆 ν は見えない。

Collapse phaseではECにより ν_e が出る → DUNEで見える

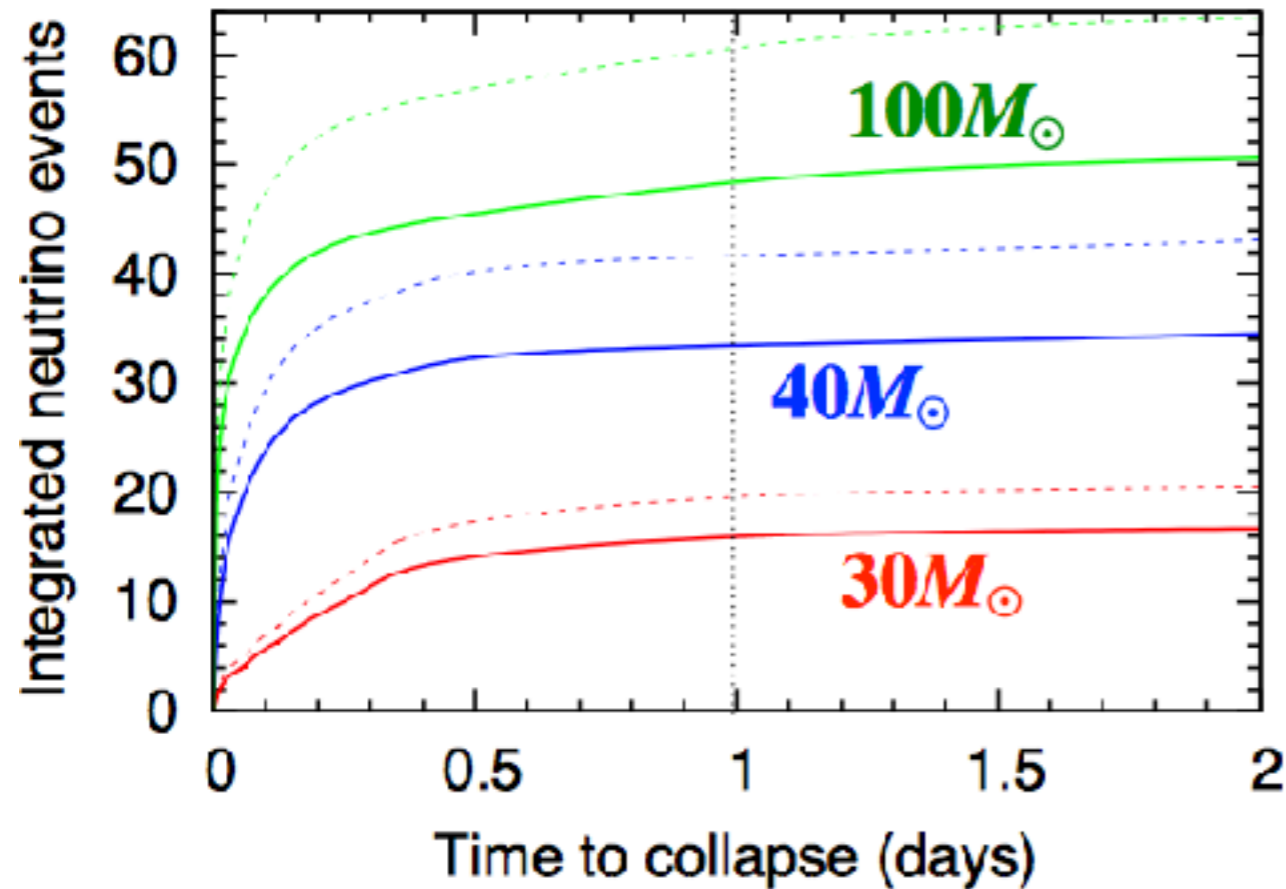
もっと重い星



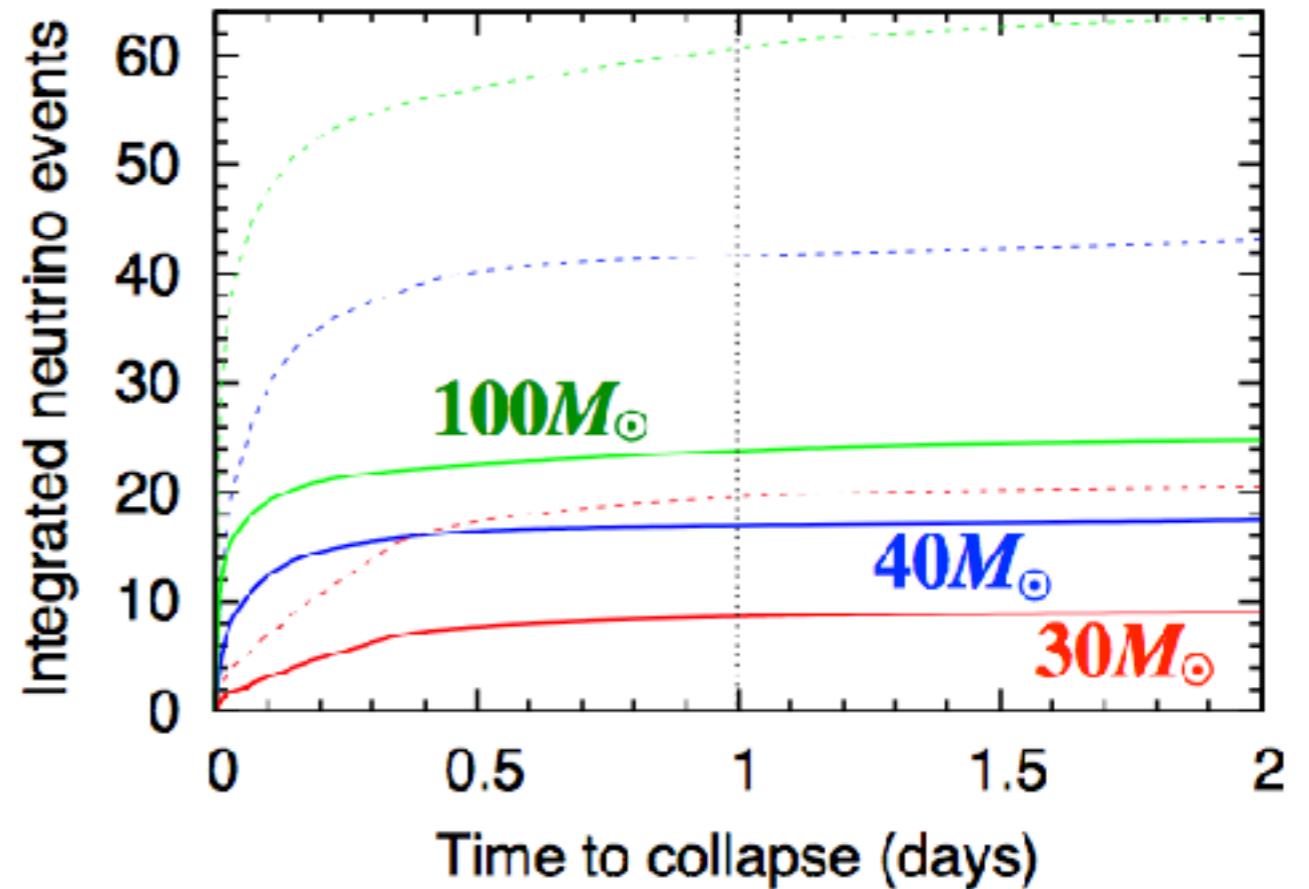
もっと重い星

KamLANDで200pcからの前兆 ν を想定

Normal mass hierarchy



Inverted mass hierarchy



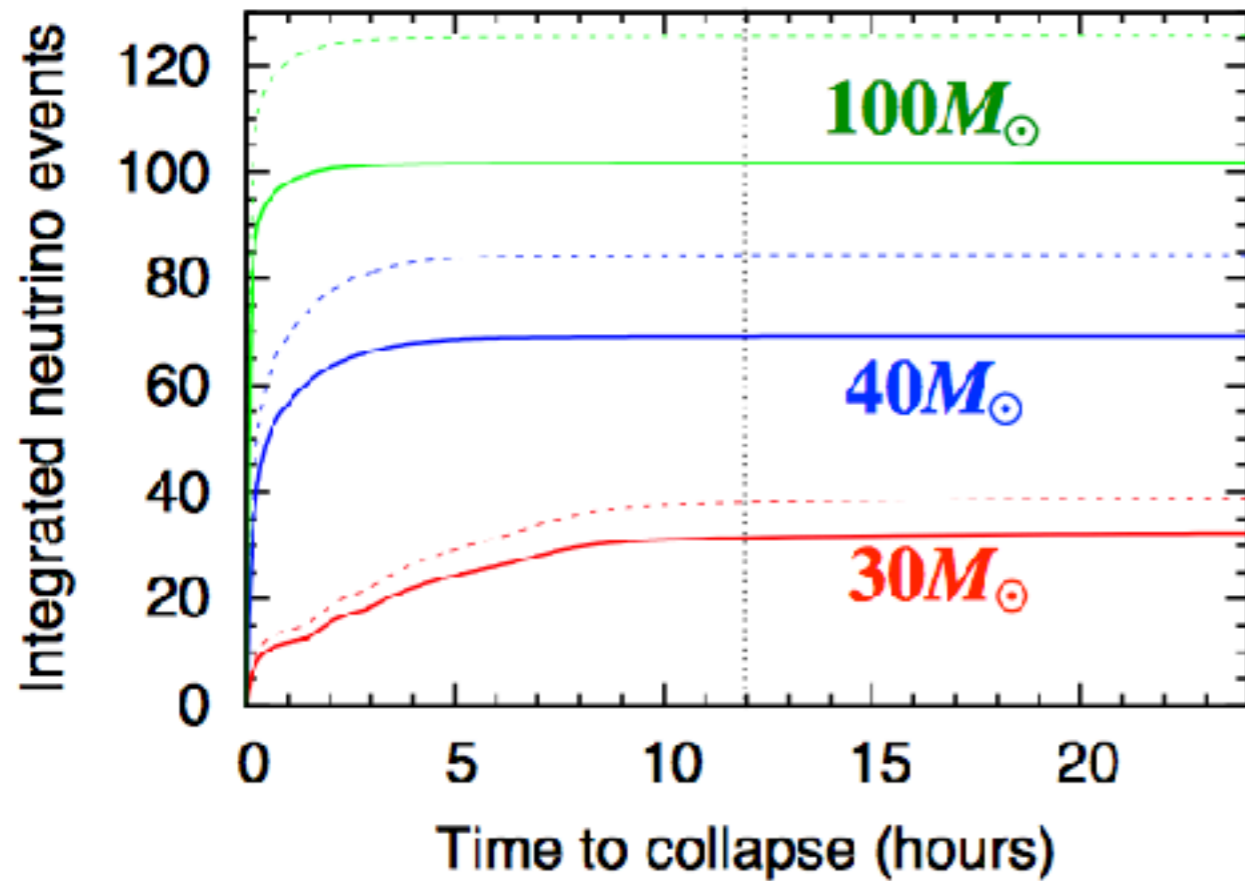
点線はニュートリノ振動なしの場合

From 吉田敬 2017年3月5日@第3回超新星ニュートリノ研究会

もっと重い星

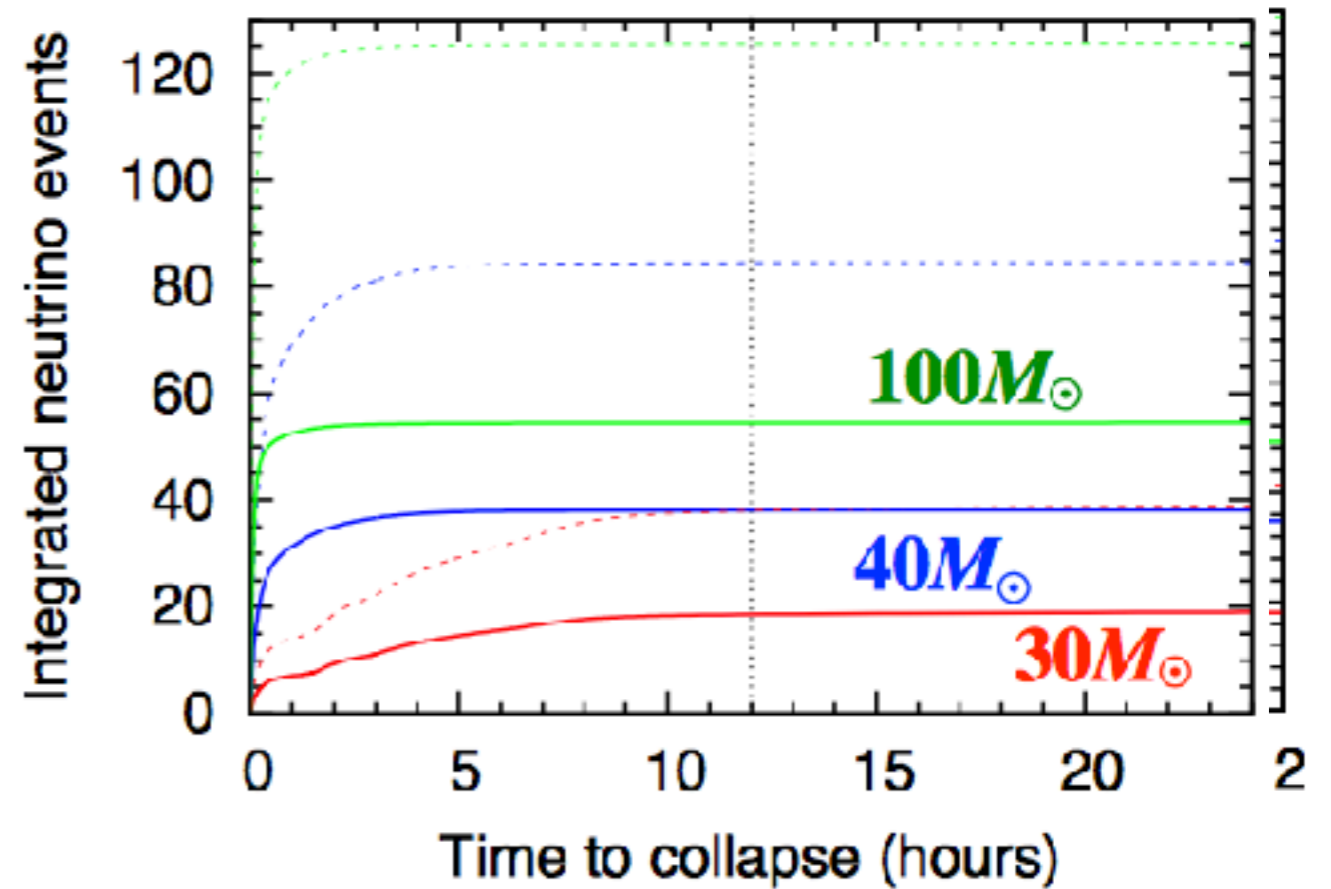
SKで200pcからの前兆 ν を想定

Normal mass hierarchy



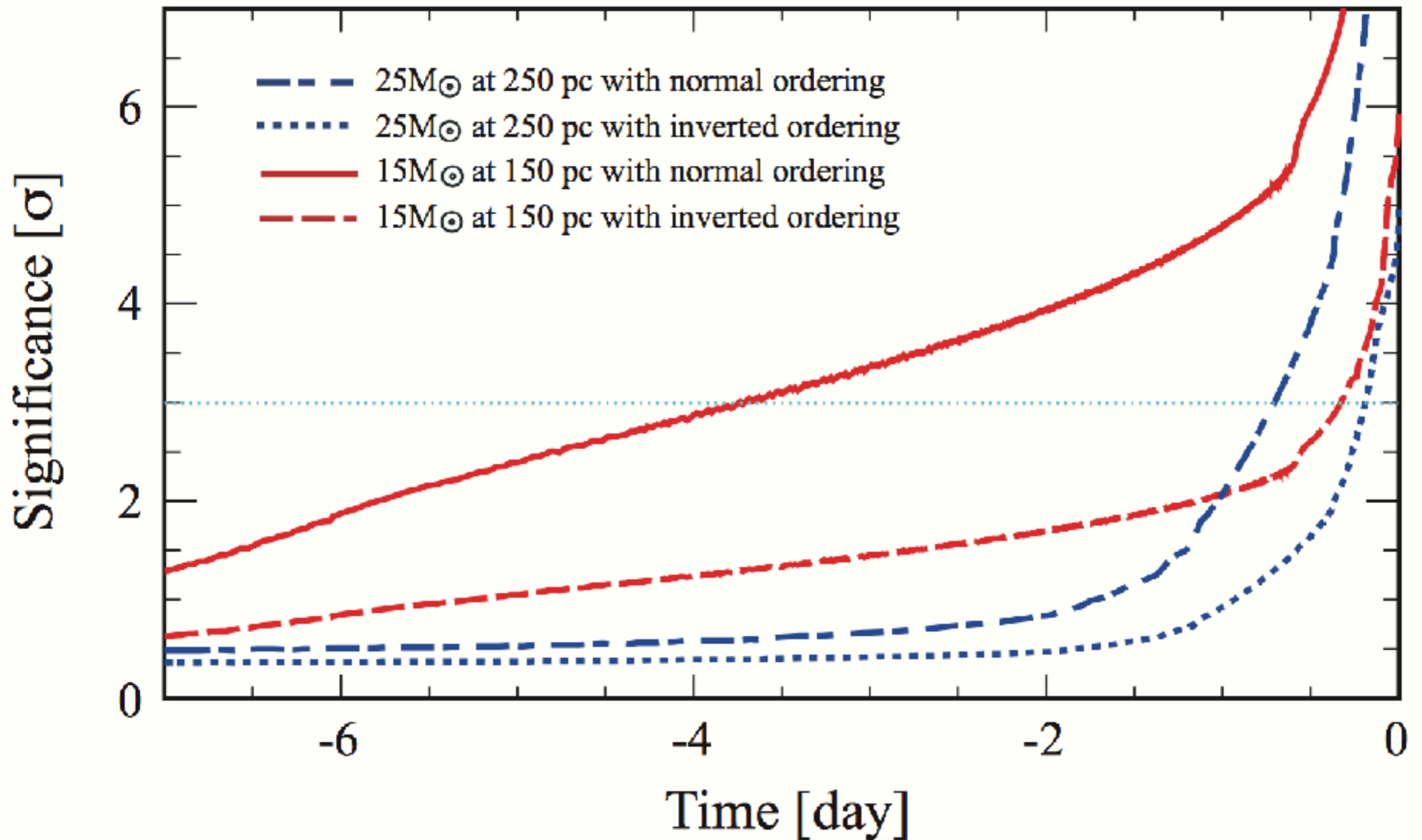
点線はニュートリノ振動なしの場合

Inverted mass hierarchy



From 吉田敬 2017年3月5日@第3回超新星ニュートリノ研究会

前兆 ν アラーム@KamLAND



LIGOのonline monitorに組み込まれている

その他

重力波イベントに相関を持つ ν 探索

GRBに相関を持つ ν 探索

ν -GWの同時解析

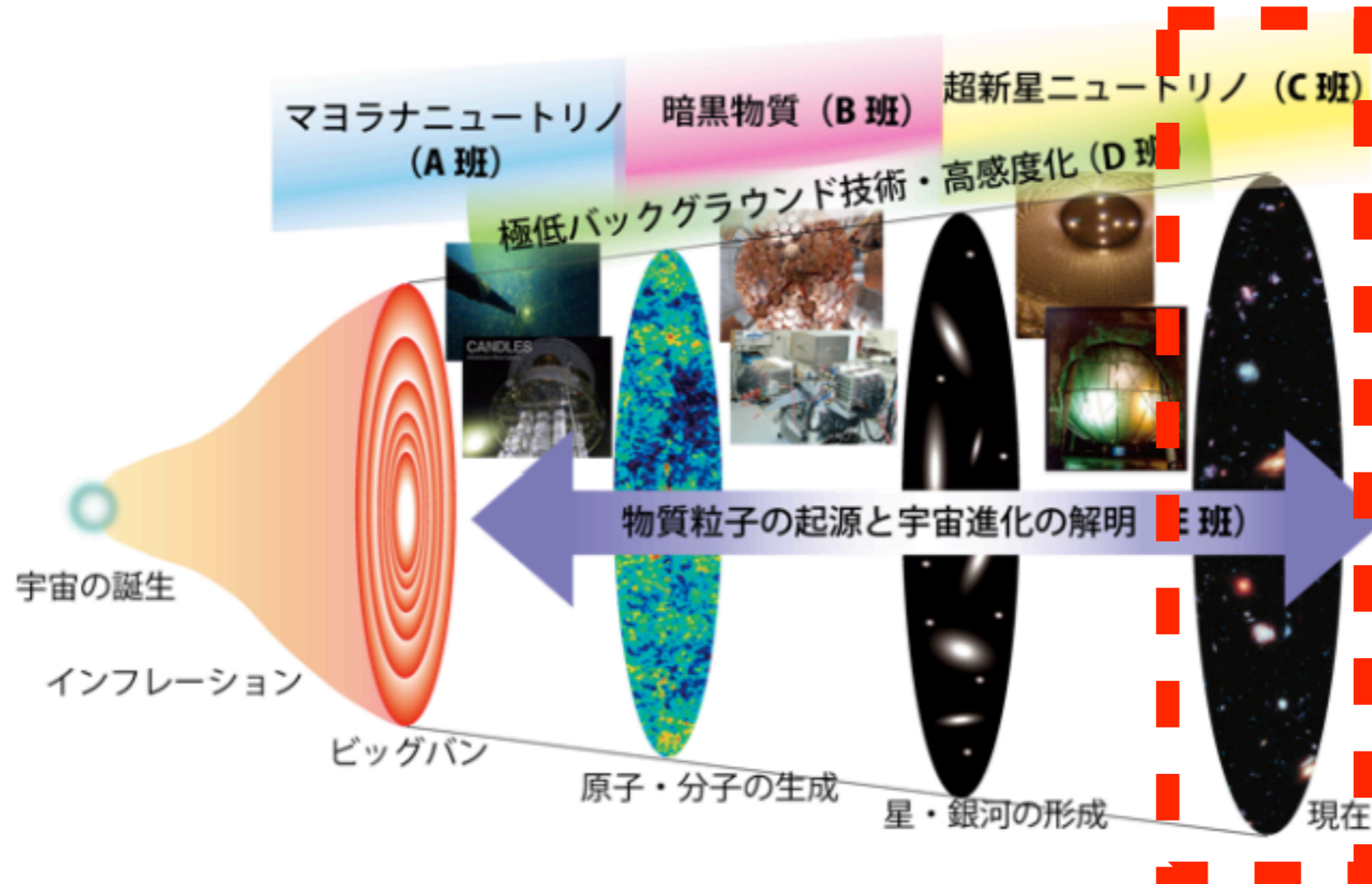
SN1987A親星の研究

中性カレントコヒーレント散乱によるSN探索 (XMASS)

近傍超新星に備えた電子回路/DAQ開発

-> 佐藤くんのポスター発表

まとめ



天体活動 (恒星進化と超新星爆発機構)

武器: 超新星前兆ニュートリノ

- 新しいモデルの開発
- 爆発前アラームの実現

電子捕獲型超新星爆発

太陽の約8-10倍の質量をもつ星は、一生の最期に電子の縮退圧で支えられる酸素・ネオン（・マグネシウム）からなるコアを形成し、超漸近赤色分枝星（Super Asymptotic Giant Branch 星, SAGB星）と呼ばれる星となる。酸素・ネオン（・マグネシウム）コアの密度が臨界密度を超えると、マグネシウム・ネオンおよび核統計平衡に達した物質による電子捕獲反応が起こる。それによって、SAGB星は重力崩壊し、それに続くコアバウンス・ニュートリノ加熱で外層が吹き飛ばされ超新星爆発を起こす。これは、電子捕獲型超新星と呼ばれ、第一原理計算によって再現された

電子捕獲型超新星 (ECSN)

● **ECSN: ONeMg** コアが殻燃焼で成長。限界質量（チャンドラセカールmass）に達し崩壊。

Normal Core collapse: Si燃焼後にできた**Fe**核が重力崩壊。

⇒どちらも中性子星を形成するが、作る機構が違うため基本的にその質量は異なる。

SN1987Aの(親星の)謎

- 爆発前に青かった！
- 3つのリングがある(親星が一旦赤➡青に戻った証拠と言われている)
- Ejecta が非対称に見える
- 組成が少し変(ヘリウムが多い)
- これらは関係しているのか無関係か？

$$\left(\frac{dL_N^{\nu_e}}{dE_{\nu_e}}\right)_{\text{osc}} = p \left(\frac{dL_N^{\nu_e}}{dE_{\nu_e}}\right)_0 + (1-p) \left(\frac{dL_N^{\nu_x}}{dE_{\nu_x}}\right)_0, \quad (49)$$

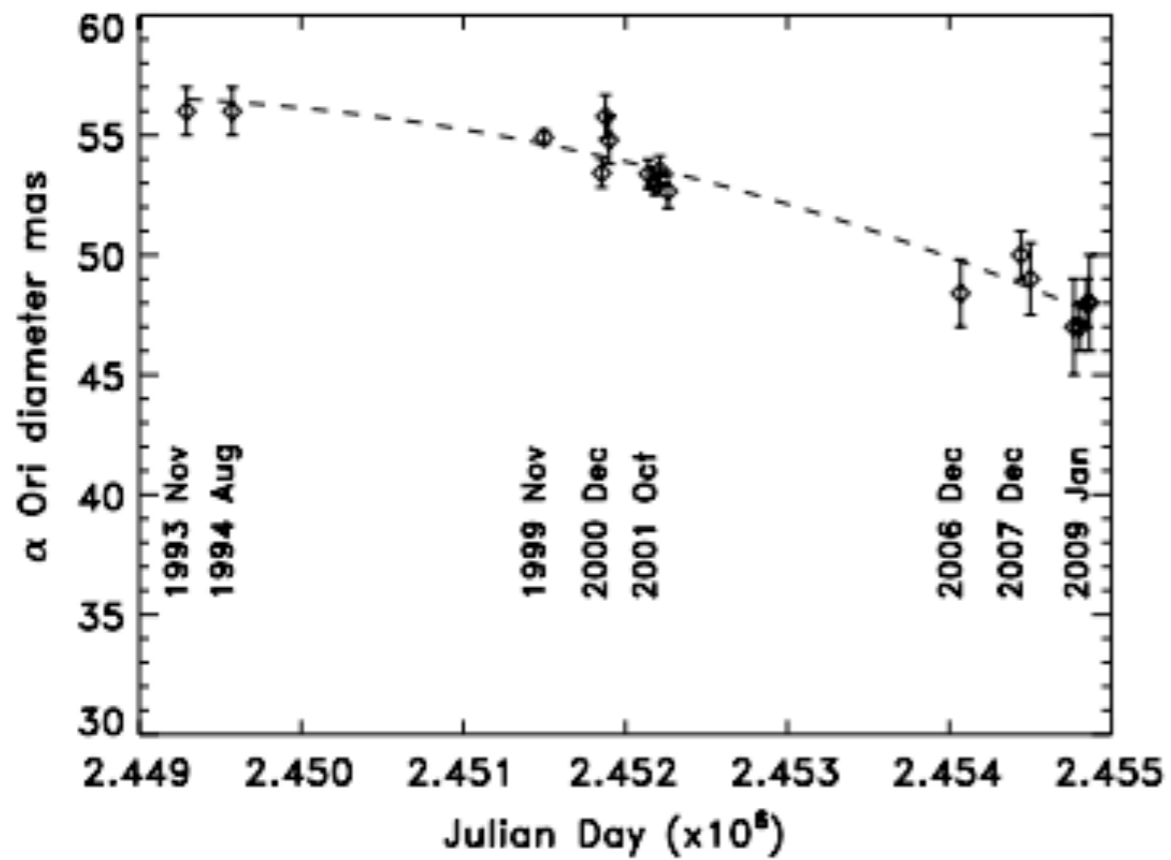
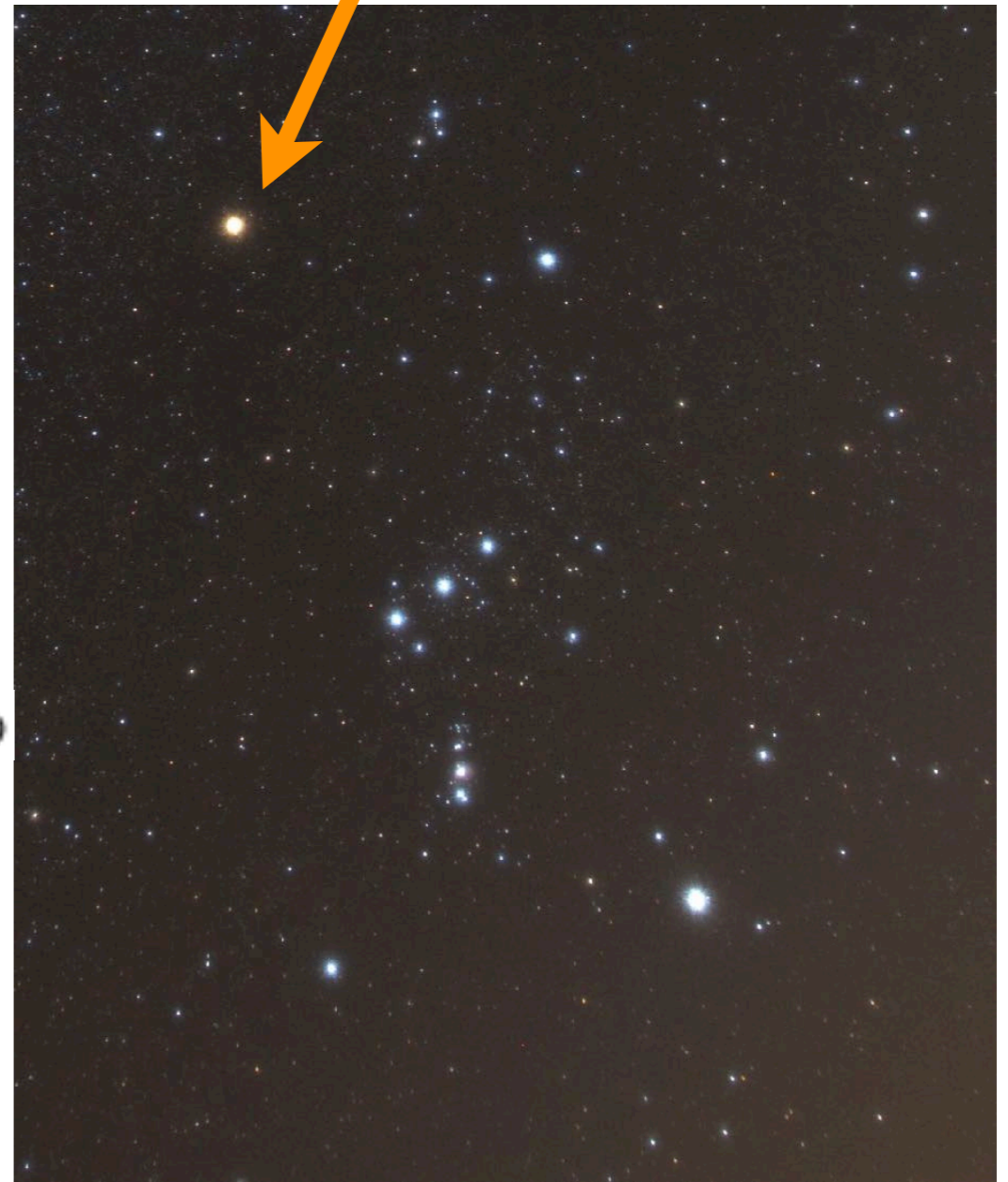
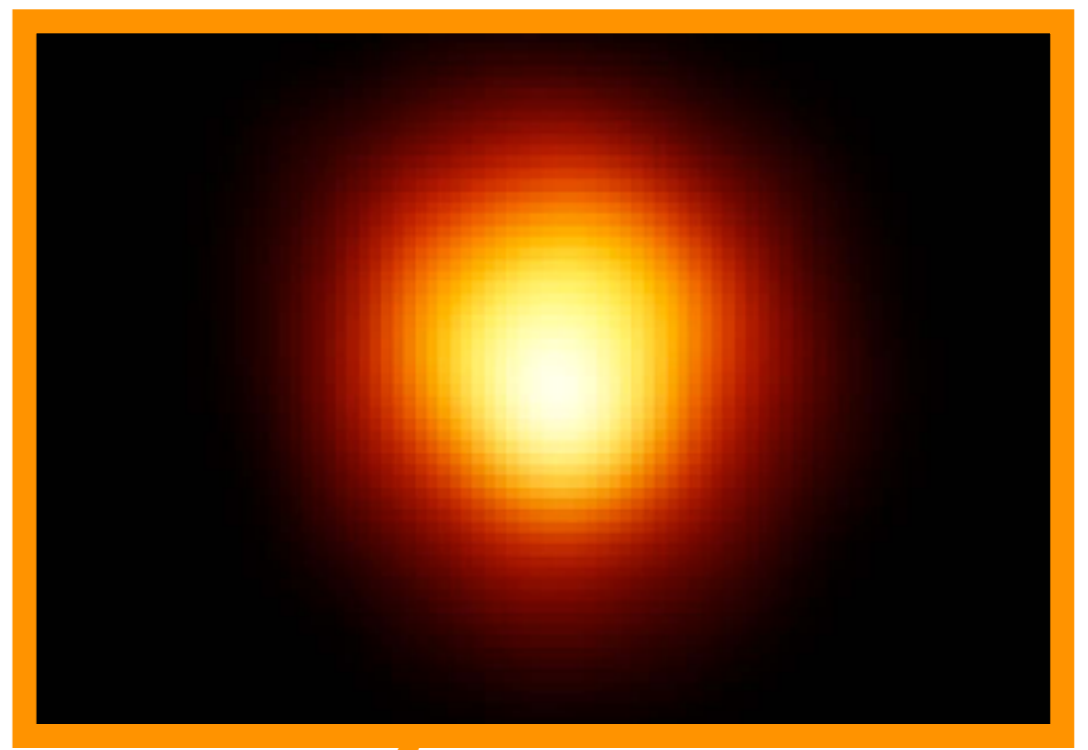
$$\left(\frac{dL_N^{\bar{\nu}_e}}{dE_{\bar{\nu}_e}}\right)_{\text{osc}} = p' \left(\frac{dL_N^{\bar{\nu}_e}}{dE_{\bar{\nu}_e}}\right)_0 + (1-p') \left(\frac{dL_N^{\bar{\nu}_x}}{dE_{\bar{\nu}_x}}\right)_0. \quad (50)$$

$$p = \begin{cases} |U_{e3}|^2 = \sin^2 \theta_{13} & \text{for normal hierarchy,} \\ |U_{e2}|^2 = \sin^2 \theta_{12} \cos^2 \theta_{13} & \text{for inverted hierarchy,} \end{cases} \quad (40)$$

$$p' = \begin{cases} |U_{e1}|^2 = \cos^2 \theta_{12} \cos^2 \theta_{13} & \text{for normal hierarchy,} \\ |U_{e3}|^2 = \sin^2 \theta_{13} & \text{for inverted hierarchy,} \end{cases} \quad (41)$$

ベテルギウス

- 赤色超巨星
- 星進化の最終段階



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 697:L127-L128, 2009

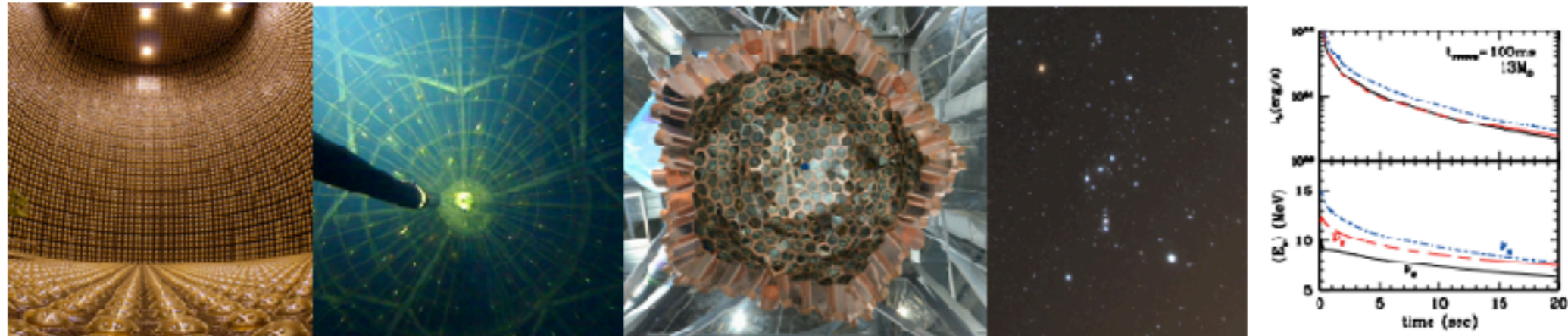
質量: $M=17-26 M_{\text{sun}}$

距離: $d=197 \pm 45 \text{ pc}$

新学術「地下素核研究」 第3回超新星ニュートリノ研究会

2017年3月4-5日, 東北大学理学研究科合同C棟

新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」
計画研究C01, C02班主催



[ホーム](#) [プログラム](#) [参加登録](#) [写真](#)

毎年開催

- 90-120分程度のチュートリアル講演
- 次回はこの冬に東京近郊

成果

- 論文13本
- 国際協力MoU

目標

- 公募研究との有機的連携

Amendment to the Memorandum of Understanding among the [Borexino Collaboration](#), the [IceCube Collaboration](#), the [LVD Collaboration](#) and the [LIGO Scientific and Virgo Collaborations](#) in order to include the [KamLAND Collaboration](#)

↩

August 22, 2016 ↩

↩

New Participant Member

With this amendment to the Memorandum of Understanding (MoU) signed on July 31, 2015 and establishing the collaboration among the [Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory \(LIGO\)](#) and its associated scientific collaboration (LSC), the [European Gravitational Observatory and Virgo Collaboration \(EGO/Virgo\)](#), the [Borexino](#) detector operated by the [Borexino Collaboration \(Borexino\)](#), the [High-Energy Neutrino telescope](#) operated by the [IceCube Collaboration \(IceCube\)](#) and the [Large Volume Detector](#) operated by the [LVD Collaboration \(LVD\)](#), a new member is introduced to the collaboration: the [KamLAND detector](#) operated by the [KamLAND collaboration](#) and represented here by its spokesperson, [Kunio Inoue](#) of the [Research Center for Neutrino Science at Tohoku University](#).

All the terms and conditions of the original MoU (attached herein) remain the same.

↩

"Detectability of galactic supernova neutrinos coherently scattered on xenon nuclei in XMASS",

K. Abe et al., *Astropart. Phys.* **89**, 51-56 (2017)

"A search for electron antineutrinos associated with gravitational-wave events GW150914 and GW151226 using KamLAND",

A. Gando et al., *ApJL*, **829** (2), L34 (2016)

"The Final Fates of Accreting Supermassive Stars",

H. Umeda, T. Hosokawa, K. Omukai, N. Yoshida, *ApJ*, **830**, L34, 5 pp. (2016)

"Explosive nucleosynthesis of ultra-stripped Type Ic supernovae",

T. Yoshida, Y. Suwa, H. Umeda, M. Shibata, K. Takahashi, *JPS Conf. Proc.* In press (3 pages).

"Neutrino emission from nearby supernova progenitors (投稿済)",

T. Yoshida, K. Takahashi, H. Umeda, *J Phys: Conf. Ser.* **718**, 062073 (5 pages) (2016)

"Supernova neutrino events relating to the final evolution of massive stars",

T. Yoshida, K. Takahashi, H. Umeda, K. Ishidoshiro, *Phys. Rev. D* **93**, 123012 (20 pages) (2016)

"KamLAND sensitivity to neutrinos from pre-supernova stars",

K. Asakura et al., *ApJ* **818** 91 (2016)

"Mass ejection by pulsational pair instability in very massive stars and implications for luminous supernovae",

T. Yoshida, H. Umeda, K. Maeda, T. Ishii, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **457**, 351-361 (2016)

"Study of electron anti-neutrinos associated with gamma-ray bursts using KamLAND",

K. Asakura et al., *ApJ* **806** 87 (2015)

"The data acquisition system of the XMASS experiment",

K. Hiraside, *Journal of Physics: Conference Series* **664** (2015) 082018.

"Development of new data acquisition system at Super-Kamiokande for nearby supernova bursts (投稿済)",

A. Ohri, T. Tomura, Y. Hayato, M. Nakahata, S. Nakayama, M. Shiozawa, K. Okumura, M. Ikeno, S. Suzuki, T. Uchida, S. Yamada, Y. Obayashi and T. Yokozawa, *Proceedings of Science (ICRC2015)* 1161 (2015)

"Pre-supernova neutrino emissions from O/Ne cores in the progenitors of core-collapse supernovae: are they distinguishable from those of He cores?",

C. Kato, M. D. Azari, S. Yamada, K. Takahashi, H. Umeda, T. Yoshida, K. Ishidoshiro, *ApJ* **808**, 168 (2015)

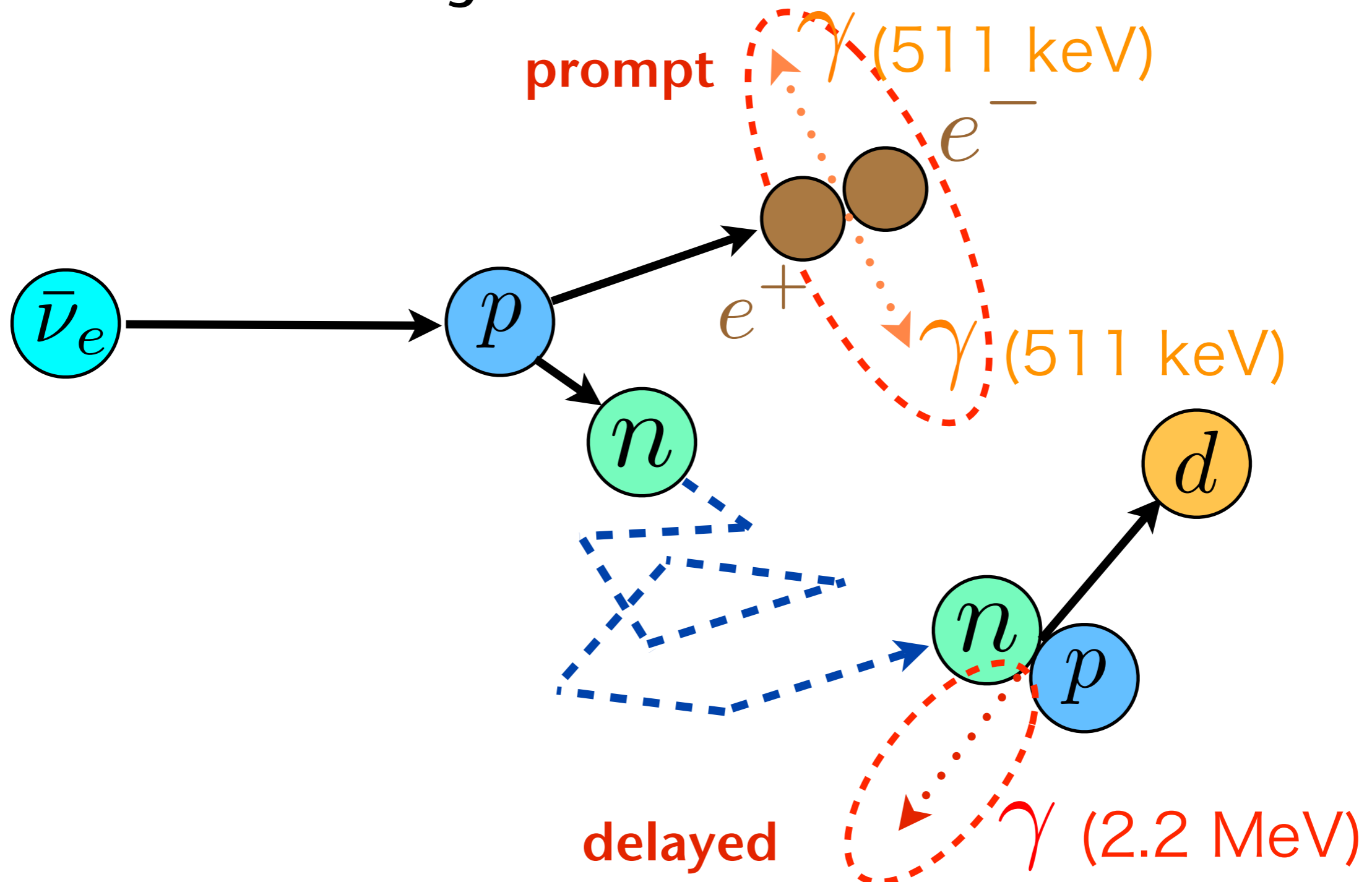
"Neutrino-driven explosions of ultra-stripped Type Ic supernovae generating binary neutron stars",

Y. Suwa, T. Yoshida, M. Shibata, H. Umeda, K. Takahashi, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **454**, 3073-3081 (2015)

KamLAND: detection principle

Anti-neutrino detection: **delayed coincidence measurement**

- **time-spatial correlated events**
- Reduction of background events



ニュートリノ振動

$$F = pF_{\bar{\nu}_e} + (1 - p)F_{\bar{\nu}_x}$$

p : survival probability

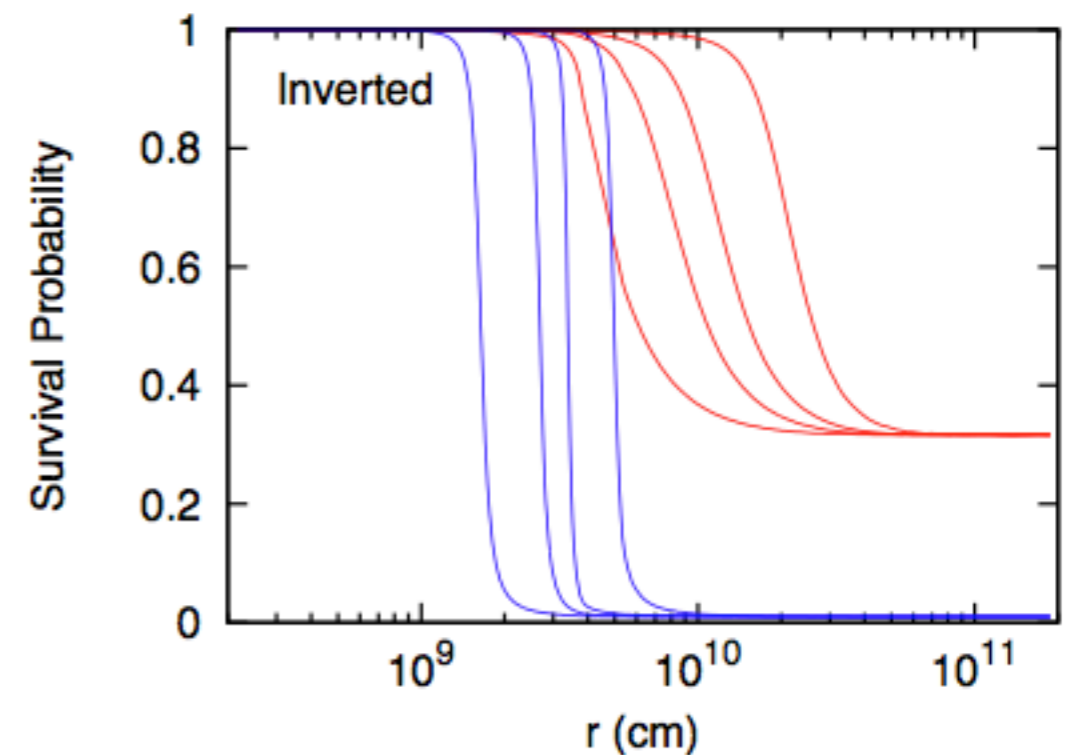
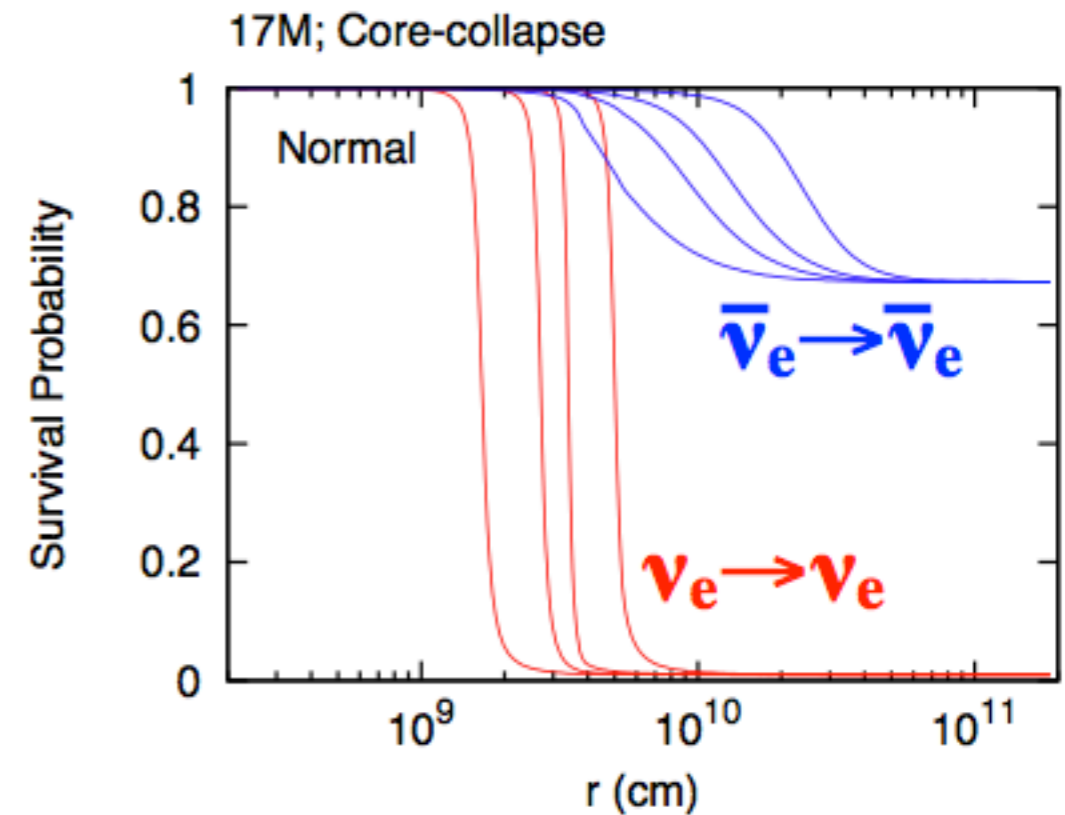
標準質量階層構造: $p=0.69$

逆質量階層構造: $p=0$

Table 3

Fraction of given neutrino flavor emitted by pair-annihilation, used in formula (9)

Burning phase	ν_e ($\bar{\nu}_e$) fraction (%)	$\nu_{\mu,\tau}/\nu_e$ ratio	Average ν_x energy (MeV)
C	42.5	1:11.4	0.71
Ne	39.8	1:7.8	0.99
O	38.0	1:6.0	1.13
Si	36.3	1:5.4	1.85



XMASSにおける超新星ニュートリノ観測

■Coherent elastic neutrino-nucleus scattering

$$\nu_x + (A, Z) \rightarrow \nu_x + (A, Z)$$

- XMASSにおける超新星ニュートリノ事象の主なプロセス。
- 全てのフレーバーに感度がある。
- O(10keV)以下の原子核反跳を観測する。

■Charged current neutrino-nucleus reactions

$$\nu_e + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z + 1)$$

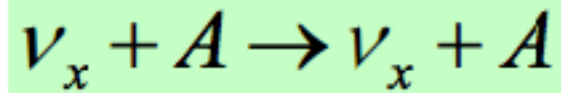
$$\bar{\nu}_e + (A, Z) \rightarrow e^+ + (A, Z - 1)$$

- 近傍超新星の場合には観測できる可能性がある。
- O(MeV)の電子事象なので、コヒーレント散乱とは区別できる。

平出さんスライド(超新星ニュートリノ研究会)

XMASSにおける超新星ニュートリノ観測

ニュートリノが原子核中の全核子と“コヒーレント”に反応して原子核が反跳される。



$$\left(\frac{d\sigma}{dT_A}\right)_w(T_A, E_\nu) = \frac{G_F^2 M}{8\pi} \left[1 + \left(1 - \frac{T_A}{E_\nu}\right)^2 - \frac{MT_A}{E_\nu^2} \right] Q_W^2 F^2(q^2)$$

$$Q_W = N - (1 - 4 \sin^2 \Theta_W)Z,$$

この反応が関与する場面

- 超新星爆発時のニュートリノに対するOpacity
- 暗黒物質の直接探索における究極的なバックグラウンド(solar, atmospheric and DSNB v

まだ一度も実験的に観測されていない

- 観測できるのは、原子核反跳のみ
- 反跳エネルギーは、数十keV以下



近年、暗黒物質の直接探索実験で
低エネルギー閾値の大型検出器
が実現した。

6

平出さんスライド(超新星ニュートリノ研究会)

KamLANDは $\nu_x + p \rightarrow \nu_x + p$ 反応がある。

KamLAND + XMASSでクロスセクションの決定も可能。

